



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



TÉCNICAS RESISTOGRÁFICAS Y ULTRASÓNICAS APLICADAS A ESTRUCTURAS DE MADERA LAMINADA ENCOLADA

Trabajo realizado por:
Omar Gómez de la Rasilla

Dirigido por:
Ignacio Lombillo Vozmediano
Ramón Sancibrián Herrera

Titulación:
Grado en Ingeniería Civil

Santander, septiembre de 2021

TRABAJO FIN DE GRADO



Agradecimientos

Antes de entrar en materia, quisiera mencionar a la gente sin la cual, creo que hubiera sido muy complicado que este trabajo llegara a buen puerto, por diferentes motivos.

Por un lado, en lo académico debo agradecer a diferentes personas.

A mis dos directores y doctores de la Universidad de Cantabria Ignacio Lombillo y Ramón Sancibrián, por su orientación durante todo el trabajo desarrollado. En especial a Nacho por su trato, como siempre, tan cercano y amable, a la vez que instructivo e interesante, haciendo que aquellos campos tan fascinantes sobre los que él trabaja y enseña me lleguen a enamorar.

Igualmente, mencionar a la doctorando Rebeca Sánchez que, a la vez de enseñarme sobre el tema de esta investigación, también he podido trabajar codo con codo con ella, tanto en las tareas de laboratorio, como pasando calor en las pasarelas a pie de calle, haciendo que el duro trabajo sea un paseo. Espero que tenga el mejor resultado posible en su tesis doctoral.

En dichas pasarelas, he podido conocer a la gente de Yofra, Pedro, Pepe y Sergio, que, aparte de ser gente excelente, me han contado los entresijos del oficio y hemos podido discutir diferentes aspectos de la elaboración de las impresionantes pasarelas que ellos fabrican, proporcionando desinteresadamente información de sus estructuras para la interpretación de los ensayos.

Por supuesto, darle las gracias a la Catedrática de la Universidad de Cantabria, María Victoria Biezma, que, con un trato siempre tan cariñoso y agradable, aparte de compartir las mañanas en la facultad de náutica, enseñándome como es el campo de la investigación, se ha preocupado sobre este trabajo y siempre me ha dado su experimentado punto de vista. En esta escuela, además, he podido compartir ideas y seguir aprendiendo con David, Mangas y Mikel.

Por otro lado, en lo personal, ha habido diferentes personas a mi lado.

En primer lugar, a mis padres Rubén y Clari, ellos tienen la mayor parte de culpa de todo lo bueno que me ha ocurrido durante mis 22 años, en lo personal, pero también en lo académico, mis recompensas son vuestras también y estoy orgulloso de la educación que me habéis dado y de que siempre me hayáis apoyado, preguntándome por mis asignaturas, mis trabajos y mis proyectos, soportando mis malos momentos, consolándome en los de tristeza y en resumidas cuentas por estar absolutamente siempre conmigo.

En estos mismos momentos, también ha sido importante mi hermano Rubén, quien ha estado toda mi vida cuidándome y vigilando de que no me saliera del camino que he querido seguir. Él sabe muy bien todo lo que me estoy encontrando en la carrera y sus consejos son siempre muy útiles. Indudablemente, además de aconsejarme en lo académico, siempre encuentro en él y en su pareja Lucía, un equipo al que me puedo unir, para hacer excursiones, ir a comer o cualquier cosa que no sea estar en casa aburrido.

Recordar a mis abuelos, Minuca y en especial a mi abuelo Efrén, que espero que esté orgulloso de mí, viéndome allá donde esté, que tanto cariño y amor me han dado y me siguen dando. Son muy importantes para mí y ojalá pudierais estar siempre a mi lado.

Respecto al día a día, me es imposible no mencionar a mis amigos, por una parte y también a mis compañeros de piso Curro y Pablo, que tan bien me hacen desconectar de la cansada y estresante rutina y con los que tan bien me lo paso.

Agradecer a los que no están presentes en esta lista por su brevedad, pero que saben bien que han aportado cosas buenas a mi vida.



Resumen

TÍTULO TFG: Técnicas resistográficas y ultrasónicas aplicadas a estructuras de madera laminada encolada.

AUTOR: Omar Gómez de la Rasilla

DIRECTORES: Ignacio Lombillo Vozmediano

Ramón Sancibrián Herrera

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Civil, Mención en Construcciones Civiles.

PALABRAS CLAVE: Madera laminada encolada; Glulam; Ensayos No-Ligeramente Destructivos; N-MDT; Xilohigrometría; Ultrasonidos; Resistografía; Ensayos de laboratorio; Ensayos in situ.

RESUMEN:

La madera laminada encolada es un material de construcción que se compone de piezas seleccionadas de madera aserrada unidas por adhesivos estructurales. Aunque su aparición data en 1901, no es hasta la reciente década de 1980 cuando ha empezado a utilizarse cada vez con más frecuencia en la construcción de estructuras con grandes luces debido a sus elevadas capacidades.

Así, el presente Trabajo de Fin de Grado tiene el propósito de investigar, recabando información y aportando nuevos resultados experimentales, sobre el empleo de técnicas no destructivas (xilohigrometría y propagación de ondas ultrasónicas) y ligeramente destructivas (resistografía) en elementos de madera laminada encolada, cuyo estudio en literatura actualmente es muy reducido, limitándose al estudio de elementos de madera aserrada.

Estos métodos no destructivos y cuasi no destructivos son de gran ayuda para la inspección de la existencia de daño de estos elementos constructivos, pudiendo realizarse campañas de ensayos in situ, con cierta facilidad y rapidez, cuya interpretación de los datos no es compleja.

Por un lado, en la investigación se ha desarrollado una extensa campaña experimental en laboratorio, en la que diferentes piezas de *glulam* (50 muestras) se han ensayado empleando las técnicas mencionadas, para después, evaluar los resultados, proponiendo correlaciones cruzadas entre los mismos.

Por otra parte, también se ha llevado a cabo una campaña experimental *in situ* en 3 pasarelas de madera laminada encolada con diferentes antigüedades (1, 10 y 20 años), en las que se han ejecutado los mismos ensayos con el objetivo de hacer una comparativa de los datos registrados en cada una de ellas, obteniendo información para proceder a una valoración de la degradación sufrida derivada del efecto de la exposición atmosférica durante distintos intervalos de tiempo.

Santander, septiembre 2021

El autor del trabajo:

Omar Gómez de la Rasilla



Abstract

TFG TITLE: Resistographic and ultrasonic techniques applied in glued laminated timber structures.

AUTHOR: Omar Gómez de la Rasilla

DIRECTORS: Ignacio Lombillo Vozmediano

Ramón Sancibrián Herrera

MAJOR: Civil engineering, Specialisation in Civil Constructions.

KEY WORDS: Glued laminated timber; Glulam; Non-Minor Destructive Tests; N-MDT; Xilohigrometry, Ultrasounds; Resistography, Laboratory tests, On-site tests.

ABSTRACT:

Glued laminated timber is a constructive material which is made from selected sawed wooden pieces joined by structural adhesives. Even though its origin dates from 1901, it is in the recent 1980 decade when its employment has become more and more frequently in high span structures building due to its high capacities.

That is why this end-of-degree project has the purpose of researching and collecting information about the use of non-destructive techniques (xilohigrometry and ultrasonic wave propagation) and minor-destructive techniques (resistography) in glulam wooden elements, whose study in research community is very reduced and limited to common wooden elements.

These non-minor destructive methodologies are really helpful in order to assess the structural integrity of these constructive elements, being able to implement on-site test campaigns with facility and speed, whose data interpretation is not complex.

On the one hand, an extensive experimental campaign in laboratory has been developed, in which different samples of glulam (50) have been tested using the mentioned techniques, to subsequently evaluate the results, proposing cross-correlations between them.

On the other hand, an in situ experimental campaign has also been carried out on 3 glulam footbridges with different ages (1, 10 and 20 years), in which the same tests have been performed with the aim of making a comparison of the recorded data to try to evaluate the degradation suffered by the effect of atmospheric exposure during different time intervals.

Santander, septiembre 2021

El autor del trabajo:

Omar Gómez de la Rasilla



Índice de Contenidos

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MARCO GENERAL Y NECESIDAD	1
1.2	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.2.1	OBJETIVO GENERAL	1
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1.3	ALCANCE	2
1.4	METODOLOGÍA Y PLAN DE ACTIVIDADES	2
1.5	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	3
2	ESTADO DEL ARTE	6
2.1	LA MADERA EN LA CONSTRUCCIÓN	6
2.1.1	ANTECEDENTES HISTÓRICOS	6
2.1.2	ESTRUCTURA DE LA MADERA	8
2.1.3	CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA	9
2.2	DEFECTOS DE LA MADERA	10
2.2.1	DEFECTOS NATURALES	10
2.2.2	DEFECTOS ARTIFICIALES EN EL SERRADO Y SECADO	11
2.3	AGENTES DESTRUCTORES DE LA MADERA	12
2.3.1	AGENTES ABIÓTICOS	12
2.3.2	AGENTES BIÓTICOS	13
2.3.3	AGENTES DE ORIGEN ESTRUCTURAL	15
2.4	PRODUCTOS DE LA MADERA PARA LA CONSTRUCCIÓN	15
2.4.1	MADERA EN ROLLO	15
2.4.2	TABLEROS DERIVADOS DE MADERA	16
2.4.3	MADERA ASERRADA	16
2.4.4	MADERA LAMINADA ENCOLADA	17
2.4.5	CONTRALAMINADA	18
2.5	MADERA LAMINADA ENCOLADA	18
2.5.1	ANTECEDENTES HISTÓRICOS	19
2.5.2	PROCESO DE FABRICACIÓN	20
2.5.3	VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA MADERA LAMINADA ENCOLADA	23
2.6	CLASIFICACIÓN MECÁNICA DE LOS ELEMENTOS DE MADERA	23
2.7	TÉCNICAS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVAS Y CUASI NO DESTRUCTIVAS	25
2.7.1	INTRODUCCIÓN	25
2.7.2	TÉCNICAS SENSORIALES	28
2.7.3	TÉCNICAS ACÚSTICAS Y DE VIBRACIÓN	30
2.7.4	TÉCNICAS ELECTROMAGNÉTICAS	31
2.7.5	TÉCNICAS MECÁNICAS O CUASI NO DESTRUCTIVAS	33
2.7.6	OTROS	37
2.7.7	RESUMEN DE LAS METODOLOGÍAS END Y ELD	38
3	CAMPAÑA DE ENSAYOS EN LABORATORIO	41



3.1	MARCO NORMATIVO	41
3.1.1	NORMAS REVISADAS	41
3.1.2	NORMAS POR FASES DEL ESTUDIO	41
3.2	DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS	44
3.2.1	MEDICIÓN DE LA HUMEDAD CON XILOHIGRÓMETRO	44
3.2.2	MEDICIÓN DE HUMEDAD EN LA ESTUFA	44
3.2.3	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS	45
3.2.4	RESISTOGRAFÍA	46
3.3	MARCO EXPERIMENTAL	48
3.3.1	DESCRIPCIÓN GENERAL	48
3.3.2	TRATAMIENTO DE DATOS POR ENSAYOS	55
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE DATOS - CAMPAÑA DE ENSAYOS EN LABORATORIO	67
4.1	HUMEDAD XILOHIGRÓMETRO Vs. HUMEDAD ESTUFA	67
4.2	DENSIDAD Vs. CLASE RESISTENTE	69
4.3	RESISTOGRAFÍA Vs. DENSIDAD	70
4.4	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS Vs. DENSIDAD	76
4.5	RESISTOGRAFÍA Vs. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS	80
4.6	RESISTOGRAFÍA Vs. HUMEDAD ESTUFA	83
4.7	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS Vs. HUMEDAD ESTUFA	85
5	CAMPAÑA DE ENSAYOS IN SITU	88
5.1	INTRODUCCIÓN	88
5.2	PASARELA DE LAS FRAGUAS (1 AÑO DE ANTIGÜEDAD)	88
5.2.1	UBICACIÓN	88
5.2.2	DETALLE CONSTRUCTIVO	89
5.2.3	ENSAYOS ULTRASONICOS	91
5.2.4	ENSAYOS RESISTOGRÁFICOS	93
5.3	PASARELA DE NUEVA MONTAÑA, SANTANDER (10 AÑOS DE ANTIGÜEDAD)	96
5.3.1	UBICACIÓN	96
5.3.2	DETALLE CONSTRUCTIVO	97
5.3.3	ENSAYOS ULTRASONICOS	99
5.3.4	ENSAYOS RESISTOGRÁFICOS	102
5.4	PASARELA DE VILLASUSO DE CIEZA (20 AÑOS DE ANTIGÜEDAD)	107
5.4.1	UBICACIÓN	107
5.4.2	DETALLE CONSTRUCTIVO	108
5.4.3	ENSAYOS ULTRASONICOS	110
5.4.4	ENSAYOS RESISTOGRÁFICOS	112
6	CONCLUSIONES	118
6.1	ESTADO DEL ARTE	118
6.2	CAMPAÑA ENSAYOS EN LABORATORIO	118
6.2.1	HUMEDAD MEDIANTE XILOHIGRÓMETRO	118
6.2.2	RESISTOGRAFÍA - DENSIDAD	118
6.2.3	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS - DENSIDAD	119
6.2.4	RESISTOGRAFÍA - VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS	119



6.2.5	RESISTOGRAFÍA - HUMEDAD ESTUFA	120
6.2.6	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS - HUMEDAD ESTUFA	120
6.3	CAMPAÑA ENSAYOS IN SITU	120
6.3.1	RELATIVAS A LOS ENSAYOS ULTRASÓNICOS	120
6.3.2	RELATIVAS A LOS ENSAYOS RESISTOGRÁFICOS	121
7	PROPUESTAS DE MEJORA Y TRABAJOS FUTUROS	124
7.1	ENSAYOS DE LABORATORIO	124
7.2	ENSAYOS IN SITU	124
	BIBLIOGRAFÍA	126
	ANEXO 1: FICHAS TÉCNICAS	131



Índice de Figuras

Figura 1. Cronograma de tareas. (Elaboración propia)	3
Figura 2. Cronología de los materiales en la construcción de puentes.....	6
Figura 3. Construcciones de la antigüedad con madera. a) Construcción del mesolítico. b) Pagoda china S. XVIII.	6
Figura 4. Clasificación general y uso de los materiales.	7
Figura 5. Partes del tronco.	8
Figura 6. Principales direcciones de la madera.	9
Figura 7. Defectos naturales de la madera. a) Nudo. b) Fenda. c) Acebolladura. d) Bolsa de resina. e) Fibra revirada. f) Entrecorteza.	11
Figura 8. Defectos en procesamiento de la madera. a) Médula incluida. b) Inclinación de fibras. c) Gema. d) Alabeo.	11
Figura 9. Agentes destructores de la madera. (Elaboración propia)	12
Figura 10. Elemento dañado por el ataque de las termitas.	13
Figura 11. Viga atacada por hongos cromógenos.	14
Figura 12. Hongos de pudrición de la madera.	14
Figura 13. Madera en rollo.	15
Figura 14. Tableros derivados de la madera. a) Madera maciza. b) Contrachapado. c) Laminado. d) Virutas orientadas (OSB) e) Partículas. f) Fibras.	16
Figura 15. Elementos de madera aserrada. a) Tablón de madera aserrada. b) Nombre de las superficies de un elemento de madera.	17
Figura 16. Elemento de madera laminada encolada.	18
Figura 17. Madera Contralaminada.	18
Figura 18. Estructuras madera laminada a) Centre Pompidou-Metz. b) Pasarela peatonal. Las Fraguas, Arenas de Iguña (Cantabria). (Fuente propia)	19
Figura 19. Estructura de madera de la estación de ferrocarril de Dieppe.	19
Figura 20. Diagrama de flujo fabricación estructura de madera laminada encolada. (Elaboración propia)	21
Figura 21. Acopio de elementos de gran longitud a partir de tablas unidas por las cabezas. ...	21
Figura 22. Bastidores de ensamblado a) Bastidor vertical para elemento recto. b) Bastidor horizontal para elemento curvo.	22
Figura 23. Clases resistentes de especies de madera aserrada.	25
Figura 24. Clases resistentes madera laminada.	25
Figura 25. Ensayo destructivo de flexión en 4 puntos.	26
Figura 26. Clasificación de las técnicas N-MDT aplicables en madera. (Elaboración propia)	28
Figura 27. Ensayo de ultrasonidos en madera aserrada.	30
Figura 28. Ensayo de vibración en madera.	31
Figura 29. Visualización de una termografía en un edificio.	32
Figura 30. Ensayo de georradar de reflexión.	33
Figura 31. Máquina de extracción de tornillos.	34
Figura 32. Fases de la ejecución de un ensayo de core drilling.	35
Figura 33. Penetrómetro PILODYN.	36
Figura 34. Ejecución de un ensayo resistográfico en el pie de un árbol.	36
Figura 35. Software de comparación de los sonidos.	38
Figura 36. UNE-EN 338: 2017. Propiedades físicas y mecánicas según la clase resistente en madera aserrada.	42
Figura 37. CTE DB SE-M. Clases resistentes para madera laminada encolada.	42



Figura 38. UNE-EN 13183-1:2019. Croquis extracción de probetas para cálculo de humedad en estufa.....	42
Figura 39. UNE-EN 13183-2: 2002. Croquis medición de humedad por método de resistencia eléctrica.....	44
Figura 40. Ensayo de ultrasonidos directo en madera aserrada. (Fuente propia).....	46
Figura 41. Ensayo resistográfico in situ para la comprobación del estado de deterioro de la madera de un árbol.	47
Figura 42. Viga de madera laminada encolada. Pino silvestre tanalizado - GL18 - 5 láminas. (Fuente propia).....	49
Figura 43. Ábaco Temperatura-Humedad Kollman madera.	49
Figura 44. Cámara de acondicionamiento a 20°C y 65% de humedad con circulación de aire interna. (Fuente propia).....	50
Figura 45. (a) Calibre marca Kalkum 300 mm. (b) Ejemplo de probeta escaneada. (Fuente propia)	50
Figura 46. Xilohigrómetro marca GANN a) Equipo conectado. b) Realización de lectura en madera laminada encolada. (Fuente propia).....	51
Figura 47. a) Equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio compuesto por centralita, dos cables de transmisión de señal y dos transductores cónicos. b) Resultados obtenidos en pantalla por el equipo durante la realización de un ensayo. (Fuente propia)	51
Figura 48. Ejecución de perforaciones para acople de transductores de US. (Fuente propia)...	52
Figura 49. Resistógrafo marca IML, modelo PD-500. (Fuente propia).....	52
Figura 50. Amplitud resistográfica óptima con parámetros feed speed 100 cm/min y drill speed 1500 rpm.	54
Figura 51. Amplitud resistográfica baja con parámetros feed speed 80 cm/min y drill speed 1500 rpm.	54
Figura 52. a) Fijación de la probeta a ensayar. b) Menú principal resistógrafo. (Fuente propia)	54
Figura 53. Ejecución de ensayo. Visualización gráfica en el equipo. (Fuente propia)	55
Figura 54. Software IML PD-Tools Pro. Visualización de gráfica resistográfica, comentarios y parámetros de ensayo. (Fuente propia)	55
Figura 55. Determinación de la longitud de perforación. (Fuente propia)	59
Figura 56. Ejemplo de montaje de gráficas sobre probeta.	60
Figura 57. Ejemplo de ficha técnica de probeta de ensayo. Página 1.....	63
Figura 58. Ejemplo de ficha técnica de probeta de ensayo. Página 2.....	64
Figura 59. Gráfica precisión humedad xilohigrómetro.	67
Figura 60. Error xilohigrómetro (en relación a la humedad por secado en estufa) - humedad xilohigrométrica.	68
Figura 61 Error xilohigrómetro (en relación a la humedad por secado en estufa) - humedad secado en estufa.	68
Figura 62. UNE-EN 338: 2017. Propiedades físicas y mecánicas según la clase resistente en madera aserrada.	69
Figura 63. Drill Resistance – Densidad (constituido por los 113 valores de los ensayos resistográficos).	70
Figura 64. Drill Resistance – Densidad (constituido por las medias de los 49 valores resistográficos medios obtenidos para cada probeta).....	71
Figura 65. Drill resistance -. Densidad corregida al 12% humedad (valores promedios para cada probeta).....	72



Figura 66. Pino Tanalizado: Drill resistance - Densidad corregida al 12% humedad. (valores promedios para cada probeta).....	72
Figura 67. Abeto: Drill resistance - Densidad corregida al 12% humedad. (valores promedios para cada probeta).....	73
Figura 68. Pino Silvestre: Drill resistance - Densidad corregida al 12% humedad. (valores promedios para cada probeta).....	73
Figura 69. Feed resistance - Densidad corregida al 12% humedad (valores promedios para cada probeta).....	74
Figura 70. Pino Tanalizado: Feed resistance - Densidad corregida al 12% humedad (valores promedios para cada probeta).....	74
Figura 71. Abeto: Feed resistance - Densidad corregida al 12% humedad (valores promedios para cada probeta).....	75
Figura 72. Pino Silvestre: Feed resistance - Densidad corregida al 12% humedad (valores promedios para cada probeta).....	75
Figura 73. Velocidad de propagación paralelo a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.	76
Figura 74. Pino Tanalizado: Velocidad de propagación paralelo a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.	77
Figura 75. Abeto: Velocidad de propagación paralelo a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.	77
Figura 76. Pino silvestre: Velocidad de propagación paralelo a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.	78
Figura 77. Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.....	78
Figura 78. Pino Tanalizado: Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.	79
Figura 79. Abeto: Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.	79
Figura 80. Pino Silvestre: Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.	80
Figura 81. Drill resistance - Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado. ...	81
Figura 82. Drill resistance - Velocidad propagación perpendicular a planos de encolado (Probeta 69 excluida).	81
Figura 83. Pino Tanalizado: Drill resistance - Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado.....	82
Figura 84. Abeto: Drill resistance - Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado.....	82
Figura 85. Pino Silvestre: Drill resistance - Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado.....	83
Figura 86. Feed resistance - Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado... ..	83
Figura 87. Drill resistance - Humedad estufa.	84
Figura 88. Feed resistance - Humedad estufa.....	84
Figura 89. Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado - Humedad estufa. ..	85
Figura 90. Velocidad de propagación paralelo a planos de encolado - Humedad estufa.....	86
Figura 91. Velocidad de propagación paralela a planos de encolado - Humedad xilohigrómetro.	86
Figura 92. Ubicación de pasarela en el municipio de Las Fraguas (Arenas de Iguña).....	88



Figura 93. Detalle constructivo de pasarela ubicada en las Fraguas. (a) Alzado. (b) Planta superior. (c) Planta inferior. Fuente: Yofra .	89
Figura 94. Imagen perspectiva in situ de la pasarela ubicada en Las Fraguas.	90
Figura 95. Ubicación de los puntos de ensayos ultrasónicos en vista en perspectiva de la pasarela ubicada en las Fraguas.	91
Figura 96. Detalle de ensayos ultrasónicos sobre pasarela ubicada en Las Fraguas. (a) Medición de humedad mediante xilohigrómetro, (b) Perforaciones para transductores ultrasónicos, (c) Medición de velocidad de propagación ultrasónica en dirección paralela a los planos de encolado.	92
Figura 97. Realización de perforaciones resistográficas. a) Paralelo a los planos de encolado. b) Perpendicular a los planos de encolado.	94
Figura 98. Ubicación de los ensayos en la pasarela de Las Fraguas.	95
Figura 99. Ubicación de pasarela en el barrio Nueva Montaña (Santander).	96
Figura 100. Detalle constructivo en perspectiva de pasarela ubicada en Nueva Montaña. Fuente: Yofra .	97
Figura 101. Imágenes in situ: (a) Vista inferior del tablero de la pasarela. (b) Perspectiva de la pasarela.	98
Figura 102. Ubicación de los puntos de ensayos ultrasónicos en vista en perspectiva de la pasarela ubicada en Nueva Montaña.	99
Figura 103. Detalle de ensayo ultrasónico sobre pasarela ubicada en Nueva Montaña.	100
Figura 104. Detalle de ensayo ultrasónico con perno roscado en situación intermedia (pasarela ubicada en Nueva Montaña).	100
Figura 105. Señalización de puntos de perforación.	102
Figura 106. Ubicación de los ensayos en la pasarela de Nueva Montaña.	103
Figura 107. Perfil resistográfico de la perforación Paralelo_4_Sup-1.	104
Figura 108. Visualización de la zona de perforación con diferentes fisuras del ensayo Paralelo_4_Sup-1.	105
Figura 109. Puntos de inspección singulares. a) Deterioro superficial. b) Fingers de unión. c) Deterioro en la zona lateral.	105
Figura 110. Perfil resistográfico Singularidad 1.	106
Figura 111. Perfil resistográfico Singularidad 2.	106
Figura 112. Perfil resistográfico Singularidad 3.	106
Figura 113. Ubicación de pasarela en la localidad de Villasuso (Cieza).	107
Figura 114. Detalle constructivo en alzado de pasarela ubicada en Villasuso de Cieza. Fuente: Yofra .	108
Figura 115. Imagen perspectiva in situ: de la pasarela ubicada en Villasuso de Cieza	108
Figura 116. Detalles de defectos en pasarela ubicada en Villasuso de Cieza.	109
Figura 117. Ubicación de los puntos de ensayos ultrasónicos en vista en alzado de la pasarela ubicada en Villasuso de Cieza.	110
Figura 118. Detalle de ensayos ultrasónicos en pasarela en Villasuso de Cieza.	111
Figura 119. Zona ensayos paralelos al encolado 1'. a) Ejecución de la perforación Par/1'/1. b) Detalle de la zona correspondiente a la parte inferior del estribo.	112
Figura 120. Ubicación de los ensayos en la pasarela de Villasuso de Cieza.	112
Figura 121. Ensayo Par/1'/Nudo + Pudrición. a) Nudo: Orificio de entrada. b) Pudrición: Orificio de salida.	113
Figura 122. Gráfica resistográfica de la perforación $\parallel/1'/\text{Nudo} + \text{pudrición}$.	114
Figura 123. Gráfica resistográfica de la perforación $\parallel/1'/3$.	114
Figura 124. Gráfica resistográfica de la perforación $\parallel/3/\text{Nudo} 1$.	114



Figura 125. Gráfica resistográfica de la perforación $\parallel/3$ /Nudo 2.	115
Figura 126. Ensayo en rigidizador vertical. a) Vista general. b) Orificio de entrada. c) Orificio de salida.	115
Figura 127. Gráfica resistográfica de la perforación en el rigidizador vertical.	116



Índice de Tablas

Tabla 1. Formatos de la madera aserrada. (Elaboración propia).....	17
Tabla 2. END y ELD para madera. Parámetros de medición y relacionables (Elaboración propia)	39
Tabla 3. Nomenclatura de las probetas clasificadas por especie y clase resistente.....	48
Tabla 4. Pruebas de amplitud con diferentes configuraciones para madera de pino.	53
Tabla 5. Dimensiones, volumen, pesos y humedad de las probetas.	57
Tabla 6. Densidad, diferencia de densidad y diferencia de humedad (Acond-Anhidro).	57
Tabla 7. Exclusión de datos extremos de velocidades ultrasónicas. Iteraciones cálculo de media y desviación típica.	58
Tabla 8. Exclusión de datos extremos por iteraciones sucesivas.....	61
Tabla 9. Variación de la media entre dos iteraciones sucesivas. Rojo > 0,5%; Verde < 0,5% (Valores absolutos).....	61
Tabla 10. Número de datos empleados en el cálculo de la media y desviación típica en cada iteración.	61
Tabla 11. Valores de media para cada probeta en diferentes iteraciones (Coloreado = Variación < 0,5%).....	62
Tabla 12. Valores desviación típica para cada probeta en diferentes iteraciones (Coloreado = Variación < 0,5%).....	62
Tabla 13. Comparación de la densidad media de cada viga con la densidad media mínima de la norma.	69
Tabla 14. Valores obtenidos en dirección paralela y perpendicular a los planos de encolado en la pasarela ubicada en Las Fraguas. Ensayo paralelo a los planos de encolado. ⊥ Ensayo perpendicular a los planos de encolado.	93
Tabla 15. Pasarela Las Fraguas: Resultados resistográficos.....	96
Tabla 16. Valores obtenidos mediante medición indirecta en pasarela ubicada en Nueva Montaña.....	101
Tabla 17. Pasarela Nueva Montaña: Resultados resistográficos.	103
Tabla 18. Valores medios de amplitud resistográfica y desviación típica para drill y feed resistance.	106
Tabla 19. Valores obtenidos en dirección paralela y perpendicular a los planos de encolado en pasarela ubicada en Villasuso de Cieza.....	111
Tabla 20. Pasarela Villasuso de Cieza: Resultados resistográficos.....	113
Tabla 21. Singularidades: Valores promedio de amplitud resistográfica y desviación típica. ..	116
Tabla 22. Promedio de amplitudes resistográficas y su dispersión respecto al total de perforaciones en cada pasarela estudiada.	121
Tabla 23. Nueva Montaña, dirección paralela a los planos de encolado: Resultados resistográficos.	122



Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación de la longitud de onda.....	32
Ecuación 2. Extracción de tornillos. Correlación densidad – fuerza de arranque.	34
Ecuación 3. Contenido de humedad de la madera.	43
Ecuación 4. Velocidad de propagación.	45
Ecuación 5. Módulo de elasticidad dinámico.....	46
Ecuación 6. Corrección de la densidad según la humedad interna.	56
Ecuación 7. Rango límite de valores extremos.	58
Ecuación 8. Corrección para la velocidad de ultrasonidos.....	58
Ecuación 9. Rango límite de valores extremos.	60



Capítulo 1

Introducción

1.1 Marco general y necesidad

1.2 Objetivos de la investigación

1.3 Alcance

1.4 Metodología y plan de actividades

1.5 Organización del documento



1 Introducción

1.1 Marco general y necesidad

La madera laminada (en inglés *Glued laminated timber, Glulam*) es un material de construcción que se basa en la unión, mediante adhesivos estructurales, de elementos de madera aserrada seleccionados. Este es uno de los productos de origen leñoso con mejores prestaciones junto con la madera contralaminada, ideal para la construcción de estructuras con grandes luces, como puentes, pasarelas, naves, piscinas, etc.

Aunque su aparición data en el año 1901, no es hasta la década de 1980 cuando ha empezado a hacerse hueco y competir con el resto de los materiales de construcción en los proyectos de obra civil y edificación, mostrando actualmente una clara tendencia creciente en su empleo.

Debido a su reciente incorporación en el ámbito de la construcción, a día de hoy, no hay muchos autores que estudien métodos de evaluación in situ para detectar la posible existencia de daño en estructuras de la madera laminada, asunto de suma importancia en vistas a realizar una adecuada conservación de dichas construcciones a lo largo del tiempo y, todavía más importante, verificar que los coeficientes de seguridad se mantienen en rangos aceptables.

Estas metodologías comprenden tanto ensayos no destructivos (END), como cuasi no destructivos, también denominados ligeramente destructivos (ELD). Las ventajas más destacables de estos métodos son la rapidez en la realización del ensayo, la comodidad en su ejecución, la portabilidad y sencillo manejo del equipo, y la relativamente fácil interpretación de los resultados obtenidos, siempre y cuando se conozcan los fundamentos de las técnicas empleadas.

Estos ensayos son capaces de proporcionar medidas de diferentes propiedades de la madera, que a su vez son relacionables con magnitudes fundamentales de los materiales leñosos íntimamente vinculados con las capacidades resistentes de estos. Algunos de ellos son la resistencia a la perforación o la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas, los cuales se pueden relacionar con otras propiedades de la madera, como la densidad o el módulo de elasticidad dinámico (MOE).

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

El presente Trabajo de Fin de Grado está dedicado al estudio de metodologías basadas en técnicas no destructivas y ligeramente destructivas aplicables a la detección de daño en estructuras de madera laminada encolada.

Debido a la falta de investigación en este campo, con este trabajo se busca **recabar información** gracias a la aplicación de **técnicas no destructivas y ligeramente destructivas** con ensayos en **madera laminada encolada**, principalmente, ensayos **resistográficos** y de **propagación ultrasónica**.

Adicionalmente, se pretende establecer una **base** para que **futuras líneas de investigación** similares puedan obtener resultados contrastables cuya base sea lo más sólida posible.



1.2.2 Objetivos específicos

- **Incrementar el desarrollo tecnológico** de las **tecnologías no destructivas y cuasi no destructivas** para la madera laminada encolada.
- Contribuir a la propuesta de una futura **metodología de diagnóstico no-ligeramente destructivo** en estructuras de **madera laminada encolada**.
- Realizar una **interpretación** individual de los datos obtenidos mediante ensayos no destructivos (**xilohigrometría y propagación ultrasónica**).
- Aportar **información cualitativa** sobre la interpretación de las **gráficas resistográficas** en madera laminada encolada.
- Aportar **información cuantitativa** a partir de los datos obtenidos de las **perforaciones resistográficas**.
- Establecer **correlaciones** de la información obtenida por las diferentes **metodologías** empleados en la campaña de **ensayos de laboratorio**.
- Hacer una **comparativa** de los **ensayos resistográficos** y de **velocidad ultrasónica** en **estructuras reales con distinto tiempo en servicio**.
- Obtener **conclusiones** respecto a los **datos** obtenidos de los ensayos y la **coherencia** de estos.

1.3 Alcance

El estudio se extenderá a la aplicación de las metodologías no destructivas en laboratorio e in situ.

En el caso de ensayos de laboratorio, el objeto de estudio serán 50 muestras extraídas de vigas de madera laminada encolada provenientes de la empresa Yofra S.A. Dichas vigas son elaboradas con diferentes especies leñosas (pino y abeto), con y sin tratamiento contra daño biológico de insectos y hongos (tanalizado) y clasificadas con diferentes categorías resistentes (GL 18 y GL 24)

En el caso de las campañas experimentales de campo, los ensayos irán dirigidos a 3 pasarelas peatonales actualmente en uso, situadas en Las Fraguas, Nueva Montaña y Villasuso de Cieza, con un tiempo en servicio de 1, 10 y 20 años, respectivamente.

1.4 Metodología y plan de actividades

El trabajo realizado durante el curso 2020-2021 se ha dividido en diferentes actividades de carácter experimental y de investigación, que se exponen a continuación:

- Búsqueda de información sobre la madera en la construcción.
- Revisión del estado del arte actual sobre las técnicas de inspección en madera aserrada y madera laminada encolada.
- Etapa de familiarización con los equipos y selección de las variables de ensayo adecuadas para el empleo en madera laminada encolada.
- Campaña de laboratorio: Ejecución de ensayos sobre 50 rebanadas de madera laminada encolada, procesamiento, interpretación de datos y propuesta de correlaciones entre los diferentes ensayos.

- Campaña in situ: Ejecución de ensayos en las 3 pasarelas de madera laminada encolada referidas, procesamiento de datos e interpretación de estos. Comprobación de la eficacia y la practicidad de la ejecución de ensayos sobre estructuras de madera laminada reales.
- Etapa de elaboración de conclusiones.

En la **Figura 1** se muestra un cronograma de actividades en el que se sitúan a lo largo del curso 2020/2021 las principales tareas que se han desarrollado.

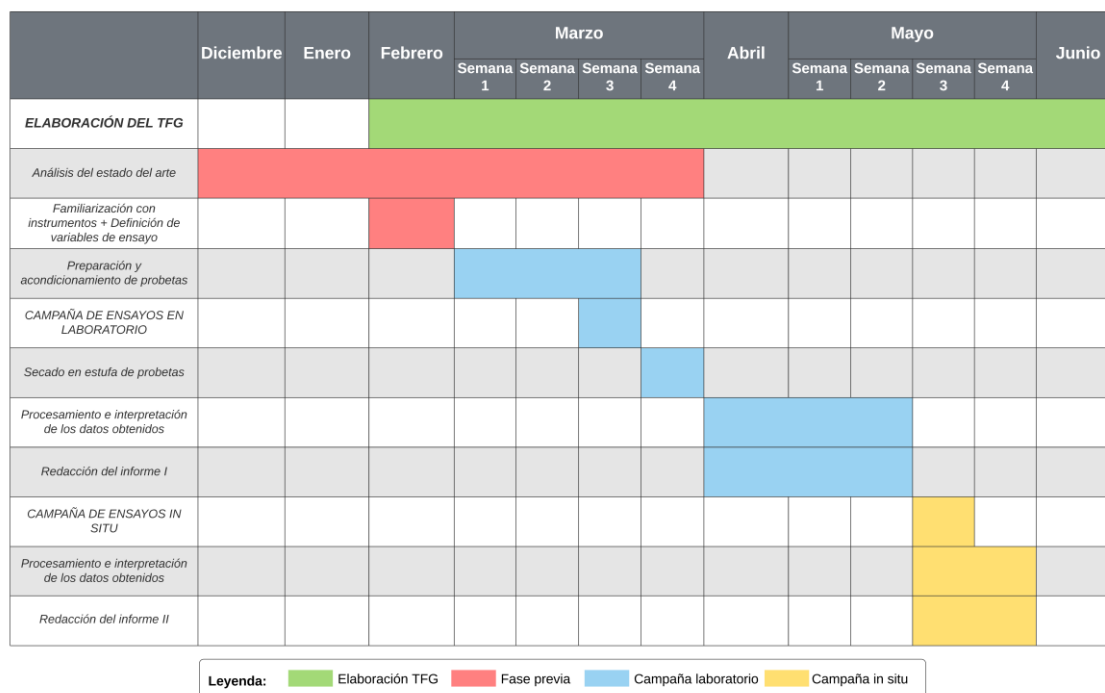


Figura 1. Cronograma de tareas. (Elaboración propia)

1.5 Organización del documento

Capítulo 1: Introducción.

En el presente capítulo se ha realizado un enfoque inicial de lo que versa este Trabajo Fin de Grado, añadiendo un breve resumen de la problemática que se trata y la necesidad de investigar en este ámbito, una exposición de los objetivos del mismo, el alcance del trabajo, la metodología seguida y el plan de actividades durante el curso 2020/2021. Por último, se incluye la presente organización del documento para una fácil y rápida comprensión.

Capítulo 2: Estado del arte.

Este capítulo contiene la información realizada por medio de una labor exhaustiva de investigación, explicando desde lo más básico de la madera como material de construcción, pasando por sus defectos, agentes destructores y los diferentes productos de madera aplicables a sistemas constructivos. Llegados a este punto, se hace hincapié en el producto de la madera laminada encolada, objeto de estudio del trabajo. Finalmente, se hace un repaso por las diferentes técnicas no destructivas y cuasi no destructivas para la inspección de la madera.



Capítulo 3: Campaña de ensayos en laboratorio.

Este apartado está dedicado a la explicación de la preparación previa de los ensayos de laboratorio, así como a la descripción de los ensayos efectuados y también de las labores de tratamiento de los datos.

Capítulo 4: Resultados y discusión de datos - Campaña de ensayos en laboratorio.

Debido a la extensión del punto 3, se ha considerado oportuno disgregar los resultados y su interpretación en un nuevo capítulo, en el que se presentan las diferentes gráficas elaboradas, fruto de la correlación por pares entre los ensayos, discutiéndolas.

Capítulo 5: Campaña de ensayos in situ.

Este capítulo está dedicado a la exposición de la metodología seguida para el ensayo de las pasarelas seleccionadas, así como el procesamiento e interpretación de la información obtenida.

Capítulo 6: Conclusiones.

El capítulo es dedicado a una recopilación de las conclusiones fundamentales de los capítulos 2, 3, 4 y 5, previos.

Capítulo 7: Propuestas de mejora y trabajos futuros.

Puesto que la investigación realizada trata sobre una problemática relativamente nueva e inexplorada, se han encontrado dificultades en el transcurso del trabajo y se ha considerado oportuno proponer aspectos a mejorar y a investigar en futuros trabajos.

Bibliografía.

A modo de recopilación, este apartado contiene la totalidad de referencias que se han citado durante todo el documento, adecuadamente referenciadas empleando la herramienta Mendeley, para que el lector pueda indagar más en detalle en los asuntos que considere oportunos.

Anexo 1: Fichas técnicas.

Finalmente, tras el documento redactado, se añaden las fichas técnicas de cada una de las probetas ensayadas en la campaña de ensayos de laboratorio, según la metodología expuesta. Estas fichas contienen, tanto datos cuantitativos obtenidos a partir de la información de recogida por los métodos de ensayo, como información cualitativa fruto de la interpretación de singularidades observadas en los ensayos llevados a cabo.



Capítulo 2

Estado del arte

2.1 La madera en la construcción

2.2 Defectos de la madera

2.3 Agentes destructores de la madera

**2.4 Productos de la madera para la
construcción**

2.5 Madera laminada encolada

**2.6 Clasificación mecánica de los elementos
de madera**

**2.7 Técnicas de inspección no destructivas
y cuasi no destructivas**

2 Estado del arte

2.1 La madera en la construcción

2.1.1 Antecedentes históricos

La madera es el material más antiguo, junto a la piedra y el barro, del cual el hombre ha tenido disponibilidad para realizar las primeras construcciones. Con él, se sentaron las bases de la edificación en forma de pequeños refugios o chozas, que cumplían con los 3 criterios de la arquitectura: La belleza, la firmeza y la utilidad.

La madera, es un material ideal gracias a sus propiedades mecánicas equilibradas y al hecho de ser un recurso renovable, que se podría considerar como inagotable, debido a su fácil cultivo.

Vemos por ello, en la siguiente **Figura 2**, que en el ámbito de la construcción de puentes la relevancia de la madera es importante.

	COMPRESIÓN	FLEXIÓN	TRACCIÓN
Prehistoria	Arcilla (tapial, adobe, ladrillo)	Madera	Cuerdas
Historia clásica	Piedra	Madera	Madera Grapas metálicas
Siglo XIX	Fundición	Madera	Cadenas de hierro
Primera mitad siglo XX	Hormigón en masa Acero laminado	Hormigón armado Acero laminado	Cables de acero
Segunda mitad siglo XX	Hormigones especiales Acero laminado	Maderas laminadas Hormigón pretensado Acero laminado Aleaciones ligeras	Cables de acero de alta resistencia, alto límite elástico y baja relajación

Figura 2. Cronología de los materiales en la construcción de puentes.¹

Por estos motivos, es frecuente encontrarnos edificios y estructuras antiguas con elementos portantes de madera. Estas construcciones, además de ser un valor histórico y monumental, tienen un fuerte valor patrimonial, como son el caso de las estructuras ilustradas en la **Figura 3**.



(a)



(b)

Figura 3. Construcciones de la antigüedad con madera. a) Construcción del mesolítico. b) Pagoda china S. XVIII.²

El uso de este material decayó a partir de la revolución industrial (2ª mitad S. XVIII en Europa y alrededor de 1830 en España), por el fuerte desarrollo de otros materiales más modernos, y por aquel entonces, de mejores prestaciones, como los materiales metálicos (primero el hierro forjado, luego la fundición y finalmente el acero) y el hormigón, que fueron dejando de lado a la

¹ Fuente: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2016/07/29/evolucion-historica-de-los-materiales/>

² Fuente: <https://www.arkiplus.com/historia-de-la-madera/>

madera, la cual pasó a desempeñar únicamente funciones secundarias o auxiliares en las construcciones.

En el siguiente gráfico, **Figura 4**, vemos la evolución del uso de los materiales, en el que la madera comparte la categoría de materiales compuestos con el hormigón armado, materiales compuestos por fibras de carbono, de vidrio, etc., los cuales, a partir del 1800 son eclipsados por los metales. No obstante, la tendencia actual del uso en construcción de los materiales compuestos observamos que es creciente.

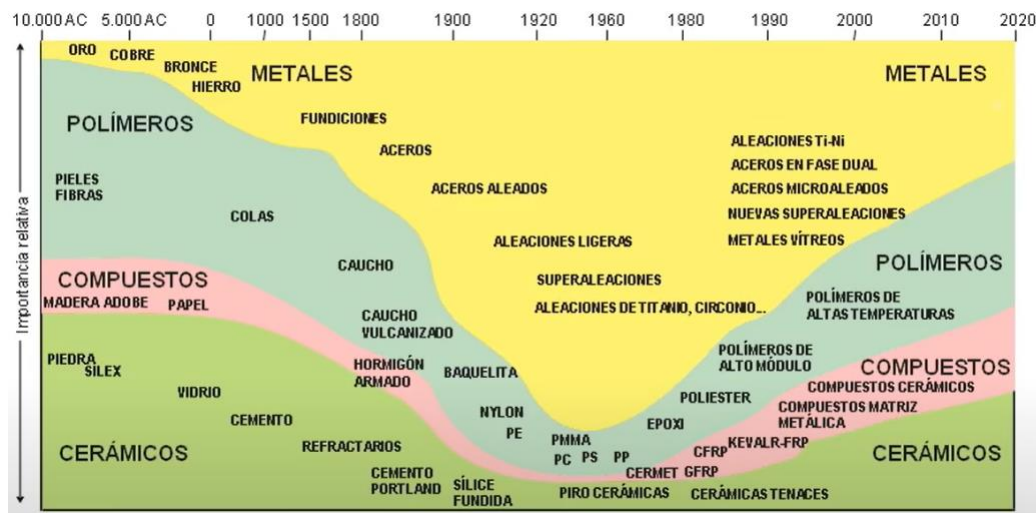


Figura 4. Clasificación general y uso de los materiales.³

Cabe mencionar que, en España, en la segunda mitad del siglo XX, se llegó a prohibir el uso de la madera para usos estructurales en viviendas acogidas a planes nacionales, por su mala eficiencia por aquel entonces, su combustibilidad y sensibilidad a ataques bióticos y abióticos [1] [2]. Por este motivo, se podría comprender la ausencia del estudio del material en los planes de estudios en las carreras técnicas universitarias.

Hoy en día, aun es tangible la percepción negativa de la peligrosidad frente al fuego de la madera en los países del mediterráneo. Sin embargo, en algunos como los países escandinavos, Canadá y los Estados Unidos, entre otros, su uso está muy extendido en la construcción. En diversos países como Finlandia, Suecia, Austria, Estados Unidos o Australia se calcula que entre el 60 y 80% de las viviendas son de madera [3].

Afortunadamente, en la última década se observa una recuperación del uso de este material en el ámbito constructivo gracias a diferentes hitos, como:

- El desarrollo de normativas específicas, como lo es, en el 2006 el Código Técnico de la Edificación (DB SE-M [4]), que incluyó por primera vez la madera en la normativa española de la construcción. Las primeras normativas referentes a madera se han empezado a introducir desde hace sólo 30 años [1].
- El diseño y aparición de nuevos formatos de la madera, usados en el sector de la construcción, como la madera laminada encolada y la madera contralaminada.

³ Fuente: <https://www.google.com/imgres?imgurl=x-raw-image:///b3961ebaed94bbc23f36ccc5e360d0f900aa44c6afacc3e877e2824f581b34a&imgrefurl=https://tecnolocoblog.files.wordpress.com/2016/12/t11-propiedades-de-los-materiales.pdf&tbnid=wruU7boelrN7-M&vet=1&docid=FuUA1jsdWXh1VM&w=790&h=461&itg=1&source=sh/x/im>

- La investigación y aplicación de tratamientos específicos para aumentar la durabilidad del material frente a agentes bióticos o abióticos [5].

En la actualidad, la madera es un claro ejemplo del diseño y uso eficiente de un material para la construcción, hasta el punto de que, en el caso de los elementos de madera laminada encolada ofrecen unas prestaciones muy elevadas, pudiendo tener cualquier tipo de geometría y tamaño, si no fuera por las restricciones debidas al transporte de estas estructuras hasta la obra.

2.1.2 Estructura de la madera

La madera es un material compuesto, que se basa en la unión de dos sustancias principalmente, fibras de celulosa cementadas con lignina. La composición ronda, dependiendo de la especie, porcentajes de celulosa del 40-61%, hemicelulosa del 15-30% y lignina del 17-35% [6].

Las capacidades mecánicas de dichos elementos son las siguientes [7]:

- **Celulosa** (fibras): Aporta la resistencia a tracción, 10.000 kp/cm².
- **Lignina** (adhesivo): Aporta la resistencia a compresión, 2.500 kp/cm².

Esta última puede compararse con el material estrella a compresión actualmente en el sector de la construcción, el hormigón. En el caso de un hormigón HA-25, tiene una capacidad resistente a compresión de 250 kp/cm². Vemos que la lignina lo supera por un factor de 10.

Este material creado por sendos elementos se obtiene de la tala de los troncos de los árboles, que presentan un crecimiento en forma de anillos, aumentando el radio unos milímetros al año.

La configuración de la madera del tronco se puede dividir en diferentes partes o capas, como se visualiza en el croquis de la **Figura 5**:

- **Corteza**: Es la protección del árbol compuesta por células muertas.
- **Cámbium**: Se encuentra entre la corteza y la albura y es la interfase donde se produce la división de células, generando nueva madera y con ello nuevos anillos de crecimiento.
- **Albura**: Células vivas más jóvenes, se ocupan del traslado de la savia hacia las diferentes partes del árbol.
- **Duramen**: Células de albura que van muriendo a medida que el árbol crece hacia el exterior. Esta es la madera más dura y la que le da soporte a la estructura del ser vivo.
- **Médula**: Eje central del tronco, donde las células ya están muertas y degradadas, por esta zona hay transporte de nutrientes esenciales.

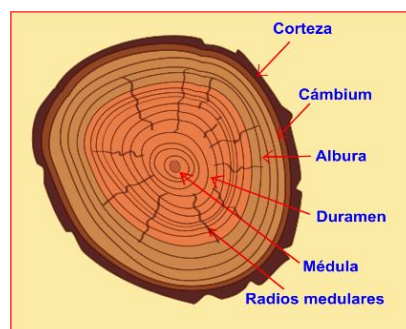


Figura 5. Partes del tronco.⁴

⁴ Fuente: https://sites.google.com/site/deptotecnolon/_/rsrc/1468864550801/3-materiales-didacticos/10-eso/materiales/la-madera/partes%20del%20tronco2.png?height=336&width=400

Tras exponer la estructura general de la madera, cabe mencionar que, a la hora del diseño de un proyecto, se debe prestar atención a la selección de la especie de madera que vamos a emplear, puesto que cada tipo de madera tiene unas propiedades físicas, químicas y mecánicas. Podemos dividir las especies de maderas en 3 amplios grupos:

- Coníferas** (blandas): Pino silvestre, pino oregón, abeto, etc.
- Frondosas** (duras): Roble, castaño, eucalipto, cedro, haya, nogal, etc.
- Tropicales**: Teka, ipé, bolondo, iroko, etc.

Otro asunto crucial, es la particularidad de la madera como material anisótropo en todas sus direcciones principales. Esto se debe a que, como se ha expuesto previamente, los diferentes componentes de la madera y el crecimiento radial en forma de anillos. Esta configuración le otorga ese comportamiento desigual en cada una de las direcciones. Es por esto por lo que, a la hora de atender a las capacidades estructurales frente a los esfuerzos de tracción, compresión, cortante, torsión, flexión o hienda (separación de las fibras, no se produce el corte de estas), es importante tener en cuenta la dirección en la que inciden las fuerzas. Dichas direcciones se exponen a continuación y se muestran en la **Figura 6**:

- **Dirección axial**: Paralela a la dirección de las fibras.
- **Dirección radial**: Perpendicular a las fibras, desde el centro (médula) hacia el exterior.
- **Dirección tangencial**: En el plano perpendicular a la dirección de las fibras, pero sin pasar por el centro del tronco. En otras palabras, en el plano horizontal y tangente a la circunferencia de los anillos.

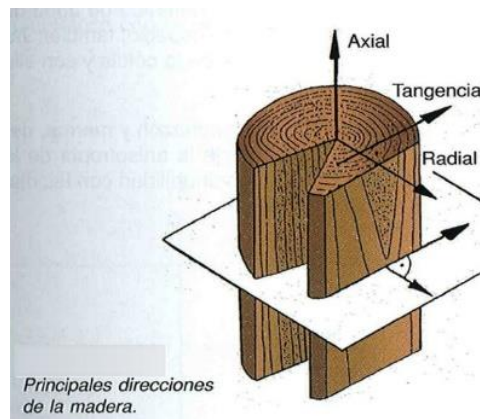


Figura 6. Principales direcciones de la madera.⁵

2.1.3 Características de la madera

Si observamos las características de la madera con un fin estructural o constructivo, vemos algunas ventajas e inconvenientes.

Las características más ventajosas o destacables de la madera con fines constructivos son:

- Reducido gasto energético en su fabricación, transporte y puesta en obra.
- Alta relación resistencia/peso.
- Buen comportamiento ante la presencia de fuego.
- Elevadas prestaciones como aislante térmico y acústico.
- Fácilmente manejable y mecanizable.

⁵ Fuente: <https://quimicasthai.files.wordpress.com/2010/03/principales-direcciones-de-la-madera1.jpg?w=736>.

- Permite montajes rápidos y con limpieza.
- Prolongada durabilidad y fácil de tratar para conseguir un largo ciclo de vida, incluso en presencia de humedad, agentes químicos agresivos y organismos dañinos.

Por el contrario, como todos los materiales, tiene algunos inconvenientes:

- Al tratarse de un ser vivo compuesto de materia orgánica, siempre es susceptible a sufrir degradación por agentes abióticos o bióticos si no es correctamente tratado.
- Combustibilidad, en la primera etapa de un incendio se produce una reducción de sección hasta que se forma una capa calcinada aislante que protege la madera.
- Cambios de volumen y de resistencia debidos a su comportamiento higroscópico.
- Falta de homogeneidad e isotropía en sus capacidades mecánicas debido a su estructura interna y presencia de irregularidades.

Algunos de las anteriores problemáticas se pueden llegar a remediar aplicando tratamientos de durabilidad o con una buena gestión de la materia prima a la hora elaborar el elemento constructivo.

2.2 Defectos de la madera

2.2.1 Defectos naturales

La madera es un material que en su estado de recepción presenta algunas singularidades de origen natural, que se desarrollan durante el crecimiento del árbol. Estos defectos, pueden llegar a afectar negativamente en el desempeño de la función del elemento que se obtiene del procesamiento del tronco. Los más comunes se describen a continuación y pueden observarse en la **Figura 7**:

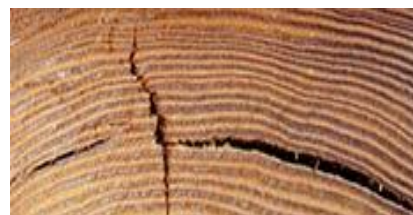
- **Nudos:** Arranques de ramas que salen al exterior o que no llegan a pasar la corteza del árbol. Esa zona del tronco es más dura y frágil que la madera sin defectos.
- **Fendas:** Roturas de la madera de algunos milímetros de anchura. Son agrietamientos longitudinales y perpendiculares a los anillos de crecimiento. Su origen se produce cuando se alternan épocas de desecación o de frío, que resultan en fuertes contracciones volumétricas, causando así la rotura de la madera.
- **Acebolladuras:** Separaciones que se dan entre dos anillos de crecimiento al experimentar fuertes heladas.
- **Bolsas de resina:** Discontinuidades en la madera en forma de cavidades rellenas de resina. El principal efecto es la reducción de sección efectiva que resiste los esfuerzos del elemento y también la desviación local que induce en la orientación de las fibras.
- **Fibra revirada:** Crecimiento más veloz en una parte del tronco que en el resto. Este fenómeno resulta, visto en planta, en un crecimiento de las fibras en espiral.
- **Otros:** Entrecorteza, anillos irregulares, doble albura, madera trenzada, etc.



(a)



(b)



(c)



Figura 7. Defectos naturales de la madera. a) Nudo. b) Fenda. c) Acebolladura. d) Bolsa de resina. e) Fibra revirada. f) Entrecorteza. ^{6 7}

2.2.2 Defectos artificiales en el serrado y secado

Otros defectos presentes en los elementos de madera pueden darse por a errores humanos en la selección y el procesado de la materia prima en los aserraderos. Los defectos más comunes podrían ser los que se mencionan a continuación y se pueden observar en la **Figura 8**.

- **Médula incluida:** Incorporación de la médula del tronco en la pieza extraída. La médula es una zona muerta y fácilmente degradable, por lo que merma las capacidades del material e incluirla en el elemento de madera también induce la aparición de deformaciones y fendas de secado. [8]
- **Inclinación de las fibras:** Desviación de las fibras respecto al eje longitudinal de la pieza elaborada. Puede ser causa de un error humano a la hora de orientar la madera o por la desviación de las fibras en una zona localizada del tronco.
- **Gemas:** Ocurren en los elementos fabricados con la madera más externa del tronco, alguna de las esquinas del exterior de la sección mecanizada puede llegar a abarcar material de capas débiles que se delaminan o incluso a quedar fuera del tronco.
- **Alabeos:** En este caso son consecuencia de un secado imperfecto, desencadenando la retracción del material y con ello la pérdida de la forma prismática del producto ejecutado.

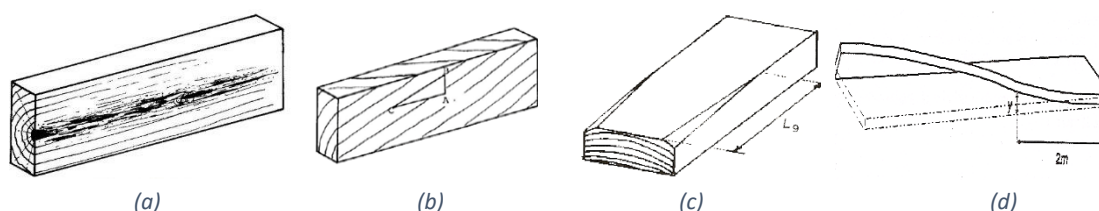


Figura 8. Defectos en procesamiento de la madera. a) Médula incluida. b) Inclinación de fibras. c) Gema. d) Alabeo. ^{8 9}

En estudios de autores, se ha podido observar que, en elementos de gran escuadría, los defectos que más afectan negativamente en el comportamiento estructural de la madera son los nudos y las desviaciones de la fibra [9].

⁶ Fuente: <https://tmolduras-fbermejo.es/defectos-naturales-de-la-madera.html>

⁷ Fuente: <https://www.maderea.es/anomalias-y-singularidades-de-la-madera/>

⁸ Fuente: <https://www.maderea.es/anomalias-y-singularidades-de-la-madera/>

⁹ Fuente: <https://normadera.tknika.eus/es/content/alabeo.html>

2.3 Agentes destructores de la madera

Como toda la materia orgánica, la madera es muy susceptible a degradarse con el paso del tiempo si no es tratada debidamente. Este proceso es catalizado por ciertos agentes externos como la temperatura o la humedad.

La norma UNE EN 41805 [10], se ocupa de la identificación de los procesos patológicos de la madera y agrupa estos agentes destructores en dos amplios grupos, dependiendo del origen abiótico o biótico de estos. Además de la norma es posible encontrar gran cantidad de autores que tratan este tema de gran relevancia para las estructuras de madera [11] [12]. Por otro lado, hay otros documentos que también incluyen como agente destructor las patologías de origen estructural [7] [13].

A continuación, la **Figura 9** muestra un diagrama en el que se clasifican las principales fuentes de degradación de los materiales leñosos.



Figura 9. Agentes destructores de la madera. (Elaboración propia)

2.3.1 Agentes abióticos

En este grupo, podemos encontrar agentes atmosféricos, como las acciones del agua, sol o hielo, pero también pueden ser de naturaleza química o daños por fuego:

- **Acción del agua:** Por la naturaleza higroscópica de la madera, el material varía su contenido de humedad a causa de la del ambiente y, por consiguiente, cambia su volumen. Este proceso origina dilataciones o contracciones en las capas superficiales y como resultado, produce la combadura de los elementos.
- **Fotodegradación:** La exposición de la madera a los rayos del sol puede afectar de diferentes maneras. Los rayos ultravioletas causan el deterioro de la lignina de la madera, mientras que los infrarrojos agravan la evaporación del agua y la aparición de fendas.
- **Acción de las heladas:** Por su parte, como es bien sabido, la congelación del agua hace aumentar el volumen del líquido, ocasionando tensiones internas y la rotura de las capas superficiales.
- **Agentes químicos:** El contacto con ciertos productos químicos podrían deteriorar el material con cierta facilidad y rapidez.

- **Acción del fuego:** Se produce la carbonización del material, reduciendo la sección efectiva de la pieza y mermando sus capacidades mecánicas.

2.3.2 Agentes bióticos

En este caso, el deterioro es producido por distintos seres vivos. Es importante remarcar que el contenido de humedad, la temperatura, la disponibilidad de oxígeno y por supuesto, la especie de madera, son variables que permiten la proliferación de estos organismos indeseables [7].

Aunque los principales son los insectos y hongos xilófagos existen algunos otros. Todos ellos se refieren a continuación.

2.3.2.1 Insectos xilófagos

Estudios apuntan que la mayoría de estos insectos degradan maderas con una humedad superior al 20% [11], también son determinantes la especie de madera, humedad y temperatura.

Entre los insectos que podemos distinguir hay dos principales familias:

- **Isópteros:** En este orden se encuentran las termitas, insectos que viven en sociedades de miles de individuos. En España hay dos tipos:
 - **Termitas subterráneas:** Se encuentran en la península. Son las más dañinas, puesto que rehúyen la luz y se desplazan bajo tierra o formando galerías hasta que dan con el elemento de madera introduciéndose en su interior. En este caso, puede llegarse a dar una situación especialmente peligrosa, porque el elemento de madera aparenta estar intacto, mientras que por dentro la colonia ha degradado por completo la estructura de la madera.
 - **Termita de madera seca:** Habita principalmente en las Islas Canarias. Ocasiona un daño observable desde el exterior (**Figura 10**) y en consecuencia permite una actuación más inmediata [11].



Figura 10. Elemento dañado por el ataque de las termitas. ¹⁰

- **Coleópteros:** Estos insectos producen daño en su ciclo larvario, creando galerías en el interior de la madera. Los más frecuentes son la carcoma fina, carcoma grande, polilla, gorgojo, bostríquidos, carcoma negra, etc. Las galerías más grandes son las producidas por la carcoma grande que rondan los 5 hasta 10 mm de diámetro [6].

2.3.2.2 Mohos y hongos xilófagos

Son organismos que aparecen en condiciones de humedad alrededor del 18-20%, también son fuertemente influenciados por la temperatura y la disponibilidad de oxígeno.

¹⁰ Fuente: J. Valero Camacho, "Evaluación no destructiva de madera antigua y patrimonial usada estructuralmente." Trabajo Fin de Grado. Universitat Politècnica de València, 2017.

Se pueden detectar, ya sea por el cambio de coloración de la madera o por el deterioro que producen en ella. Además, otros síntomas de su presencia son su olor característico y/o la presencia de insectos xilófagos, puesto que favorecen su ataque [13].

Existen 2 principales agrupaciones:

- **Mohos y hongos cromógenos:** Organismos que se alimentan de las sustancias almacenadas en la madera y tan solo ocasionan cambios en la tonalidad (**Figura 11**), es decir, el daño se reduce a la componente estética. En la península el caso más común es el hongo de azulado.



Figura 11. Viga atacada por hongos cromógenos. ¹¹

- **Hongos de pudrición:** En este caso, el hongo se alimenta de la lignina y/o celulosa de la madera, comprometiendo la integridad de la estructura, **Figura 12**.

La norma UNE EN 41805 [10] hace una subdivisión de estos últimos:

- **Pudrición parda o cúbica:** Deterioro de la celulosa formando estructura de pequeños prismas.
- **Pudrición blanca o fibrosa:** Se alimenta de la lignina y en menor medida de la celulosa.
- **Pudrición blanda:** Textura final blanda o esponjosa por el ataque a la celulosa.



Figura 12. Hongos de pudrición de la madera. ¹²

2.3.2.3 Xilófagos marinos

Causan un deterioro similar a los insectos xilófagos, pero en elementos de madera que están en contacto con agua salada. Algunos crustáceos o moluscos desarrollan sus etapas más jóvenes

¹¹ Fuente: M. G. Sanz, "Estudio sobre el estado de conservación de la cubierta del Martinete de Navafría." Trabajo Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Madrid, 2012, [Online]. Available: <http://oa.upm.es/36345/>

¹² Fuente: <https://maderame.com/hongos-madera/>

dentro de la madera de estos elementos produciendo la degradación del material. Mientras que los moluscos producen una degradación no visible, la de los crustáceos se puede observar desde el exterior.

2.3.2.4 Bacterias y algas

Son otros organismos que degradan la estructura de la madera. Sin embargo, causan un daño mucho más leve en el material que le de los agentes anteriormente expuestos.

2.3.3 Agentes de origen estructural

Estos motivos de degradación provienen de errores en el diseño que afectan directamente a la estabilidad y resistencia del elemento. Normalmente, suelen aparecer al poco tiempo de la puesta en servicio de la estructura. Algunos de los más comunes son los siguientes:

- Sección insuficiente.
- Deformaciones excesivas por fluencia de los elementos.
- Fallo en las uniones.
- Concentraciones de singularidades en una zona puntual.
- Arriostramiento insuficiente.

2.4 Productos de la madera para la construcción

La madera de las plantaciones forestales, antes de cubrir su función estructural, tiene que pasar por un proceso de fabricación con el que la materia prima adopta la geometría de diseño del elemento constructivo y, por otro lado, se garantizan la calidad del producto final.

Las especies leñosas más empleadas para la fabricación de elementos estructurales se diferencian en coníferas (abeto, pino silvestre, pino laricio, pinaster, pino insigne, etc.) y frondosas (eucalipto, castaño, etc.) [14].

Los principales productos de la madera son los que se exponen a continuación [15][16].

2.4.1 Madera en rollo

Elemento de sección circular conformado por el tronco desramado y descortezado como los de la **Figura 13**. Se suelen emplear como viguetas de forjados, cerchas, tablaestacas, pilotes en cimentaciones, cercados, postes, etc.



Figura 13. Madera en rollo. ¹³

¹³Fuente: http://www.cscae.com/area_tecnica/aitim/actividades/act_paginas/libro/productos_de_madera_para_la_arquitectura.pdf

2.4.2 Tableros derivados de madera

- **De madera maciza Figura 14 a):** Son piezas de madera de reducida escuadría unidas encolando sus caras. Comúnmente empleados en carpintería, encofrados y elementos estructurales.
- **De chapas:**
 - **Contrachapados Figura 14 b):** Chapas encoladas a 90º e impares. Habitualmente empleados en cubiertas, puesto que son ligeros y resistentes.
 - **Laminados Figura 14 c):** Chapas paralelas encoladas a presión y en caliente. Su aplicación toma lugar en estructuras de vigas, cerchas, cubiertas, etc.
- **De virutas orientadas (OSB) Figura 14 d):** Tableros conformados por virutas de madera encoladas y prensadas. Son usados en cerramientos, entrevigados de forjados, paneles sándwich, etc.
- **De partículas Figura 14 e):** Los tableros de partículas o aglomerados son esencialmente partículas a presión unidos con adhesivo y en calor. Normalmente se encuentran en tabiquerías, falsos techos, encofrados, etc.
- **De fibras Figura 14 f):** Se elaboran con fibras orientadas prensadas con o sin la aplicación de calor en el proceso. Las encontramos en carpintería, bases de cubiertas, tabiquería, etc.

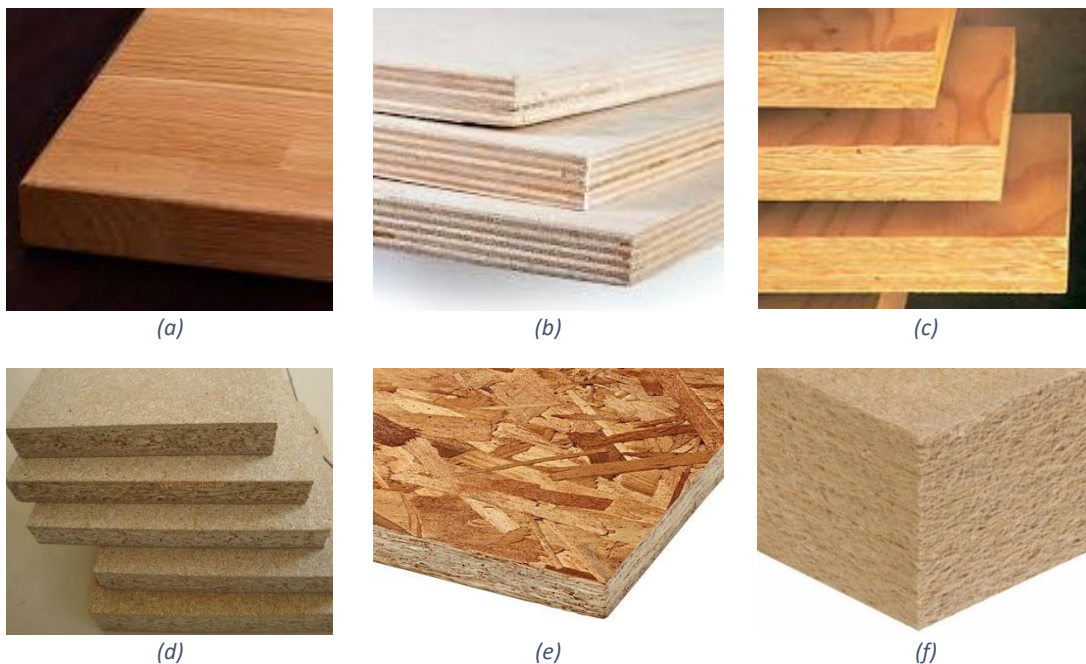


Figura 14. Tableros derivados de la madera. a) Madera maciza. b) Contrachapado. c) Laminado. d) Virutas orientadas (OSB) e) Partículas. f) Fibras. ¹⁴

2.4.3 Madera aserrada

Ha sido el producto estrella de la madera hasta tiempos recientes. Son piezas macizas de madera cortada del tronco de un árbol, normalmente con las caras opuestas paralelas entre sí y con las aristas perpendiculares a estas. **Figura 15 a)**. La nomenclatura de las distintas caras de un elemento de madera se muestra en la **Figura 15 b)**.

¹⁴Fuente: http://www.cscae.com/area_tecnica/aitim/actividades/act_paginas/libro/productos_de_madera_para_la_arquitectura.pdf



Figura 15. Elementos de madera aserrada. a) Tablón de madera aserrada. ¹⁵ b) Nombre de las superficies de un elemento de madera. ¹⁶

Los principales usos que se le da a este formato de la madera son en la carpintería, pero además desempeñan la función de viguetas, correas, etc., y elementos de forjados, entablados, etc.

En la siguiente **Tabla 1** se indican algunos de los formatos de la madera aserrada dependiendo del grosor de las piezas y de su sección [8][12]:

Tabla 1. Formatos de la madera aserrada. (Elaboración propia)

Producto	Geometría de la sección	Dimensiones de la sección
Madero	Cuadrada	Mayor de 10 cm
Tablón	Rectangular	Relación 1/3 (Espesor/Anchura) Espesor mayor que 4 cm
Listón	Cuadrada	Espesor de entre 5 y 10 cm
Tabla	Rectangular	Espesor de entre 1,5 y 4 cm
Listoncillo	Cuadrada	Espesor menor de 5 cm
Chapa	Rectangular	Espesor milimétrico

2.4.4 Madera laminada encolada

Se elabora gracias a la unión de varias piezas de madera aserrada. La unión de una pieza con otra en sentido longitudinal se efectúa con una unión mecánica y encolada, mientras que las uniones transversales se realizan únicamente con un encolado sobre las tablas y los cantos [17]. De esta manera se pueden formar elementos de grandes dimensiones, que además permite geometrías curvas y de canto variable. (**Figura 16**)

Se profundizará más sobre este formato en el apartado 2.5 *Madera laminada encolada*.

¹⁵ Fuente: <https://img.interempresas.net/fotos/958279.jpeg>

¹⁶ Fuente: <http://www.interempresas.net/FotosArtProductos/P154969.jpg>

2.4.5 Contralaminada

Tableros encolados de forma similar a los anteriores, pero en este caso entre capa y capa, las fibras de las tablas se disponen a 90° respecto a las de los tableros contiguos. **(Figura 17)** Este procedimiento se lleva a cabo para conseguir un comportamiento del conjunto pseudo-isótropo en dos de sus direcciones principales. Sus aplicaciones fundamentalmente son en elementos estructurales verticales, forados y cubiertas.



Figura 16. Elemento de madera laminada encolada.¹⁷



Figura 17. Madera Contralaminada.¹⁸

Estas últimas dos últimas soluciones, madera laminada encolada y madera contralaminada, son las ideas constructivas de madera más novedosas en la actualidad y se están empleando cada vez con más frecuencia en elementos estructurales, gracias a sus elevadas prestaciones mecánicas, su ligereza, comportamiento acústico, térmicos, etc.

2.5 Madera laminada encolada

La madera laminada encolada, también conocida en inglés como Glulam (*Glued laminated timber*), es uno de los productos comerciales para construcciones de madera con mejores capacidades resistentes.

Este formato nace de la necesidad de solventar unas de las principales dificultades que ofrecía la madera, la imposibilidad de cubrir grandes luces, debido a la limitación de tamaño de los troncos, y la dificultad de diseñar tanto estructuras curvas, como de canto variable, **Figura 18**.

Por ello, la madera laminada encolada es una buena solución para la construcción de estructuras de puentes, pasarelas, piscinas, centros comerciales, bodegas, gimnasios, etc.

En esencia, la madera laminada encolada se compone de elementos seleccionados de tablas de madera aserrada seleccionadas según el número de defectos que contienen. Estos elementos se unen entre sí con un adhesivo estructural que les da un comportamiento solidario. El espesor de las tablas es menor de 45 mm y se encolan tres o más láminas.

No obstante, hay un formato que se emplea para elementos secundarios en las estructuras y que tienen mayores espesores y compuesta con menos láminas. Reciben el nombre de dúos y tríos (dos o tres láminas encoladas, respectivamente) [18].

¹⁷ Fuente: G. N. Brekke, M. Hanisch, K. B. Schule, G. Alem, C. Hannisch, and E. A. Stubenrauch, "Madera laminada encolada," pp. 322–332, 1980.

¹⁸ Fuente: <https://ingenio-production.s3.eu-west-1.amazonaws.com/articles/image-6dd42b59-7af4-43b4-9efa-d936937959b0/Que-es-el-CLT-Sanite-Diagnosis-de-la-Madera-5.jpg>



(a)



(b)

Figura 18. Estructuras madera laminada a) Centre Pompidou-Metz. ¹⁹ b) Pasarela peatonal. Las Fraguas, Arenas de Iguña (Cantabria). (Fuente propia)

2.5.1 Antecedentes históricos

Los primeros productos que se asemejaron a la madera laminada encolada provienen de las antiguas civilizaciones china y egipcia con el empleo de tableros de listones unidos con adhesivo. Leonardo Da Vinci, por su parte, ideó algunos bocetos de ingenios militares. Por otra parte, el francés Philibert de L'Orme trasladó las técnicas de la piedra a estructuras en arco de láminas de madera con uniones metálicas [15].

En el siglo XIX, el coronel Francés Emy diseñó una solución para una estructura de cubierta en la estación de ferrocarril de Dieppe, **Figura 19**, la cual, estaba construida con tablas de madera dispuestas en horizontal y unidas con pasadores metálicos [3].

La madera laminada encolada, como la conocemos hoy en día, se origina en Weimar (Alemania), en los comienzos del siglo XX, gracias a Otto Karl Freidrich Hetzer, quien patentó en 1901 un modelo de vigas rectas compuestas por láminas unidas con adhesivo. Este diseño se conoció internacionalmente en la Exposición Mundial de 1910 en Bruselas.

En las primeras décadas existía cierto escepticismo respecto a la capacidad de este material frente a otros más comunes como el acero.



Figura 19. Estructura de madera de la estación de ferrocarril de Dieppe. ²⁰

¹⁹ Fuente: https://4.bp.blogspot.com/-GM27K4C_aUg/WNHh0JAtShI/AAAAAABJa0/38fVY-ZkScwIgfInkE4aZrmQQRE2bO4ZgCLcB/s1600/900_1pompidou metz shigeru ban jamesewing 12.jpg

²⁰ Fuente: https://files.structurae.net/files/350high/wikipedia/Gare_de_Dieppe_04.jpg



En 1936, un hito para la madera laminada encolada fue cuando el arquitecto Edgar A. Stubenrauch, hizo una comparativa exhaustiva en la selección del material a emplear en los arcos de la cubierta de un edificio que había proyectado, resultando la madera como el material que en teoría tenía un coeficiente resistencia/coste mejor.

Otro evento importante fue en el sector aeronáutico, cuando cada vez los aviones eran de mayores dimensiones y los hangares, por consiguiente, también lo tenían que ser. La madera laminada fue una buena solución al problema y un ejemplo icónico fue el hangar construido para la aerolínea St. Paul's Northwest en 1941, que contó con 12 arcos de 46,3 m de luz y una altura de 10,6 m.

Este material también tuvo protagonismo en la reconstrucción de las ciudades después de la Segunda Guerra Mundial, con el que se ahorró ingentes cantidades de dinero comparado con la inversión que se hubiera hecho en construcciones de acero [17].

En la década de 1950, el uso del glulam en Estados Unidos contaba con una buena aceptación y una percepción social como un producto de construcción de primera clase.

En 1995, había aproximadamente 30 fabricantes de madera laminada encolada para estructuras en los Estados Unidos de América, la mayoría de los cuales estaban dentro del *American Institute of Timber Construction* (AITC).

Paralelamente al desarrollo de este producto a nivel mundial, en la península ibérica, no se empieza a incluir en proyectos hasta la década de 1980 y habrá que esperar hasta mediados de la década de 1990 para que la madera laminada comienza a popularizarse en las estructuras. La introducción de esta técnica se da gracias a las influencias arquitectónicas francesas, país en el que estaba mucho más implantada que en España.

Mientras que, en el año 1996, en España se emplearon 6.000 m³ de este producto, en 2008, aumentaron a un total de 100.000 m³. Estos datos del volumen consumido de madera laminada a lo largo de los años permiten percibir la acogida del material en nuestro país. No obstante, en la Unión Europea, todavía España es de los países que menos la emplea, junto con Portugal y Grecia [3]. En el año 2014, los primeros en el ranking europeo son Noruega y Finlandia [19].

2.5.2 Proceso de fabricación

Para la fabricación de este producto, la norma EN UNE 14080 [20], establece las especies de maderas aptas para el procesamiento de los elementos. Las principales son el abeto, abeto douglas, pino (silvestre, pinaster, radiata y laricio), chopo, cedro, etc.

Las tablas de estas especies pasan por un proceso de selección en base a su calidad resistente, se explicará este proceso en el apartado 2.6 *Clasificación mecánica de los elementos de madera*.

En la **Figura 20** se observa el proceso de fabricación de un elemento de madera laminada a partir de los elementos de madera aserrada que se acaban de mencionar [3][19].

El proceso de fabricación comienza con un tratamiento de protección de autoclave. Dicho tratamiento se aplica siempre a las piezas individuales, nunca a la pieza encolada final.

En la primera etapa, se seca la materia prima hasta una humedad de 8-15%. La humedad del material de las láminas de un elemento no debe diferir en más de un 4%, para ello se usa un xilohigrómetro.

Una vez hecha la comprobación, las tablas de madera pasan por un proceso de selección, para eliminar las secciones con defectos, con el objetivo de evitar la merma de las propiedades mecánicas finales del elemento.

Una máquina rotativa de corte crea los sistemas de uniones dentadas en las testas de los elementos. Seguidamente, estas piezas libres de defectos se encolan, para unir las por las secciones transversales (testas), para formar así una tabla de una longitud importante. El ensamblado se realiza lo antes posible, tras el mecanizado para favorecer el encolado. Para la unión se ejerce presión en la dirección paralela a la fibra y se unen las dos piezas mecánica y químicamente. Las colas empleadas pueden ser de caseína, urea y resorcina. Pero también existen de poliuretano, vinílicas, fenólicas y epoxi.



Figura 20. Diagrama de flujo fabricación estructura de madera laminada encolada. (Elaboración propia)

En la **Figura 21** se observa un acopio de estos elementos ya unidos.



Figura 21. Acopio de elementos de gran longitud a partir de tablas unidas por las cabezas. ²¹

Tras el fraguado de la cola, se cepillan las láminas para conseguir una buena adherencia en la siguiente etapa de unión de las largas tablas.

²¹ Fuente: http://www.tecnologiadelamadera.es/Tecnologia_de_la_madera/Documentales_2.html

El elemento final, surge de la unión de varias láminas encoladas, pegadas, dando forma a un elemento de construcción que puede tener enormes dimensiones.

Si la geometría es recta, el bastidor metálico sobre el que se aplicara la presión para su unión acumula las láminas en vertical **Figura 22 a)**. En el caso de tratarse de estructuras curvas, los tabloncillos se unen en un bastidor de armado horizontal, desplazando las tablas en railes y aplicando la presión lateralmente **Figura 22 b)**.

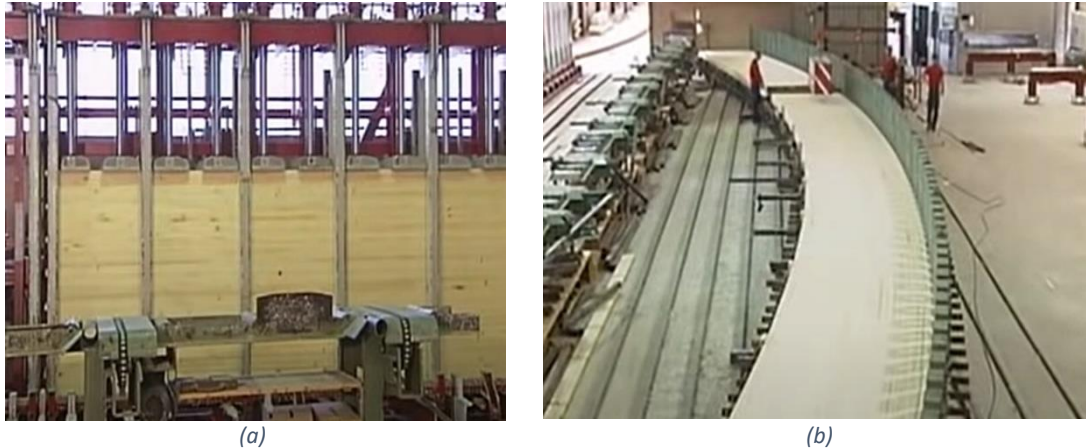


Figura 22. Bastidores de ensamblado a) Bastidor vertical para elemento recto. b) Bastidor horizontal para elemento curvo. ²²

La presión y la temperatura se deben mantener constantes durante el fraguado, monitorizando todos los parámetros. Puesto que la madera cede, aliviando presión en los elementos de unión temporal, esta tensión se deberá ajustar con el paso del tiempo durante el prensado. La temperatura será de unos 20°C y la humedad relativa del aire mayor del 30%.

Tras el fraguado del adhesivo, las piezas se almacenan en un lugar con temperatura similar a la anterior, para conseguir la resistencia óptima de la cola.

Para finalizar, los elementos se regruesan quitando las cejas de las láminas y excesos de cola. La pieza se somete al mecanizado para añadir los puntos de anclaje y unión con otras piezas. Y, por último, se aplican los tratamientos de protección contra hongos, insectos y protección frente a los rayos del sol.

Al finalizar todo el proceso, los fabricantes deben hacer unos controles de calidad, sobre todo para asegurar que el elemento falla por las capacidades de la madera y no por las uniones encoladas. Los ensayos que se realizan son los siguientes [21]:

- a) **Flexión hasta rotura:** Resistencia unión dentada.
- b) **Cortante o cizalla:** Para comprobar la línea encolada.
- c) **Ensayo de delaminación:** Simulación del comportamiento en ambientes agresivos, equivalente a largos periodos a la intemperie. Este proceso induce tracciones, que, en las zonas encoladas ineficientemente, causan delaminación y aberturas entre láminas.

²² Fuente: http://www.tecnologiadelamadera.es/Tecnologia_de_la_madera/Documentales_2.html



2.5.3 Ventajas e inconvenientes de la madera laminada encolada

La madera laminada encolada, como hemos expuesto anteriormente, es una de las soluciones más óptimas para la construcción de estructuras que incluyen espacios con grandes luces. Pero además de esta propiedad tiene más ventajas en comparación con otros materiales [18]:

- Posibilidad de cubrir grandes luces de más de 50m. Este parámetro está limitado por la operabilidad de los fabricantes y de los transportes.
- Requerimientos resistentes exigentes. El glulam mejora las prestaciones de la madera aserrada hasta un 30%, comparándose elementos de las mismas dimensiones [21].
- Geometrías de canto variable y elementos curvos.
- Selección de elementos de madera libres o con pocos defectos naturales.
- La componente del peso propio es reducida.
- Solución prefabricada, que abarata los costes y acorta los plazos de ejecución.
- Estructuras con una cuidada variable estética.
- Destacado comportamiento al fuego, frente materiales más comunes como el acero o el hormigón.
- Gasto energético durante su producción relativamente bajo. 430 kWh/t de madera laminada, en comparación con el acero que exige 2.700kWh/t.
- Posibilidad de tratado superficial para ofrecer resistencia frente agentes químicos agresivos.
- No es necesario realizar tareas de mantenimiento tan frecuentemente, ideal para estructuras con difícil acceso.

El glulam, como el resto de materiales, también tiene inconvenientes [22][23]:

- Estos elementos no ofrecen una resistencia tan excepcional frente a solicitaciones cortantes ni tensiones tangenciales.
- Requieren de un riguroso cálculo estructural y alto control de calidad.
- El coste de elementos rectos puede llegar a ser mayor que el de madera maciza, por tanto, comienza a ser rentable económicamente a partir de ciertas magnitudes.
- La complejidad añadida por la variable del adhesivo estructural.
- Equipos y mano de obra específica.
- El transporte a obra de estructuras grandes, en especial las curvas, se dificulta.
- El manejo para la puesta en obra requiere de maquinaria especial.

2.6 Clasificación mecánica de los elementos de madera

En la actualidad, es cada vez más frecuente que cada país cuente con una normativa al respecto, para regular las calidades de los elementos de madera. En España, se acude al CTE DB-M [4], publicado en 2006, que expone los requerimientos de las normas UNE EN 1912 [24], UNE EN 56544 [25] y UNE EN 56546 [14], para otorgar estas categorías. Antes de la aparición del CTE, las clases resistentes se regulaban a través de la norma UNE-EN 338 [26].

Para otorgar una clase resistente a un elemento, primeramente, la especie de madera del elemento tiene que ser una de las contempladas en las normativas, ya que son de las que se han realizado un exhaustivo estudio y se conoce su comportamiento. Para cada clasificación se establecen unos requisitos de densidad, de propiedades mecánicas y de rigidez.



Mediante este procedimiento, el organismo de normalización expone las pautas a seguir para garantizar que un tipo de madera tiene unas propiedades iguales o mayores que los correspondientes a su clase resistente otorgada.

Para entender cómo se clasifica la madera laminada encolada, el producto elaborado en el que se centra este trabajo, es necesario referir a la clasificación que se realiza para los elementos de madera aserrada por separado.

Para la clasificación de los elementos de madera aserrada, las normativas UNE EN 56544 [25] y 56546 [14], referentes a especies de coníferas y de frondosas, respectivamente, exponen un método de clasificación visual, según las irregularidades que presentan los elementos de materia prima.

Mientras tanto, el Código Técnico de la Edificación: Documento Básico de Seguridad Estructural dedicado a la Madera [4], indica un procedimiento más restrictivo, exigiendo valores mínimos de densidad, resistencia y rigidez, como se indica en la **Figura 23**. La nomenclatura de cada clase hace referencia a la resistencia característica en el ensayo de flexión. *Ejemplo: C22 = Madera con una resistencia característica a flexión de 22 N/mm².*

Al igual que la madera aserrada, el CTE: DB SE-M [4] hace una división según la clase resistente de los elementos de madera laminada encolada **Figura 24**. Se puede clasificar un elemento mediante dos procedimientos:

- a) Experimentalmente, mediante ensayos normalizados.
- b) Deduciendo teóricamente sus propiedades a partir de las de las diferentes láminas de madera aserrada empleadas.

El segundo de ellos establece una diferencia, atendiendo a si sólo se ha empleado una clase resistente en las láminas o si es distinta.

- **Madera laminada encolada homogénea:** Solo una clase resistente.
Ejemplo: GL24h se atribuye a un elemento compuesto por láminas con sólo una clase resistente de C24.
- **Madera laminada encolada combinada:** Láminas externas de una clase resistente superior que las internas.
Ejemplo: GL24c consta de láminas externas de C24 e internas de C18.



	Clase	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propiedades de resistencia en N/mm²													
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción paralela a la fibra	$f_{t0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	22,5	26	30	33,5
Tracción perpendicular a la fibra	$f_{t90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compresión paralela a la fibra	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
Compresión perpendicular a la fibra	$f_{c90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0
Cortante	f_{vk}	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propiedades de rigidez en kN/mm²													
Módulo de elasticidad medio en flexión paralela a la fibra	$E_{m,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
Módulo de elasticidad característico en flexión paralela a la fibra (5% percentil)	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,1	10,7
Módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo de cortante medio	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad en kg/m³													
Densidad característica (5% percentil)	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Densidad media	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520
<p>NOTA 1 Los valores dados en esta tabla para la resistencia a tracción, resistencia a compresión, resistencia a cortante, módulo de elasticidad característico en flexión, módulo de elasticidad transversal medio y módulo de cortante medio se han calculado utilizando las ecuaciones dadas en la Norma EN 384.</p> <p>NOTA 2 Los valores de resistencia a tracción se han estimado de forma conservadora teniendo en cuenta que la clasificación se ha realizado partiendo de la resistencia a flexión.</p> <p>NOTA 3 Las propiedades relacionadas en esta tabla son aplicables a la madera que presente un contenido de humedad que corresponde a una temperatura de 20 °C y una humedad relativa del 65%, lo que equivale a un contenido de humedad del 12% para la mayor parte de la especies.</p> <p>NOTA 4 Los valores característicos de resistencia a cortante son para madera sin fendas, de acuerdo a la Norma EN 408.</p> <p>NOTA 5 Las clases pueden aplicarse también a maderas frondosas que presenten un perfil resistente y densidad similares, tales como el chopo o el castaño.</p> <p>NOTA 6 La resistencia a la flexión de canto puede utilizarse también en el caso de flexión de tabla</p>													

Figura 23. Clases resistentes de especies de madera aserrada. ²³

Tabla D.2 Correspondencias conocidas entre Clases Resistentes de madera laminada encolada y de madera aserrada

	Clases resistentes		
Madera laminada encolada homogénea	GL24h	GL28h	GL32h
- Todas las láminas	C24	C30	C40
Madera laminada encolada combinada	GL24c	GL28c	GL32c
- Láminas externas ⁽¹⁾	C24	C30	C40
- Láminas internas	C18	C24	C30

(1) Los requisitos se aplican al sexto del canto extremo de cada lado con un mínimo de 2 láminas.

Figura 24. Clases resistentes madera laminada. ²⁴

2.7 Técnicas de inspección no destructivas y cuasi no destructivas

2.7.1 Introducción

2.7.1.1 Evolución de los ensayos

Tradicionalmente, el procedimiento para comprobar las capacidades de los materiales, entre ellos la madera, ha sido haciendo uso de técnicas rudimentarias y tradicionales, no estandarizadas, junto al conocimiento empírico de los profesionales del oficio. Esta técnica destaca por el conocimiento profundo de los artesanos y, a la vez, por introducir un factor subjetivo muy elevado.

Posteriormente, con los avances tecnológicos e implementación del método científico, se pudo empezar a calcular las capacidades de los elementos mediante el empleo de técnicas

²³ Fuente: M. De Fomento, CTE: DB SE-M. Documento Básico Seguridad Estructural - Madera. 2019

²⁴ Fuente: M. De Fomento, CTE: DB SE-M. Documento Básico Seguridad Estructural - Madera. 2019

destructivas, llevando al límite a las probetas y obteniendo los datos. Algunos ejemplos de estos son el ensayo de tracción, de flexión en 3 y 4 puntos (**Figura 25**), de corte paralelo a la fibra, etc.

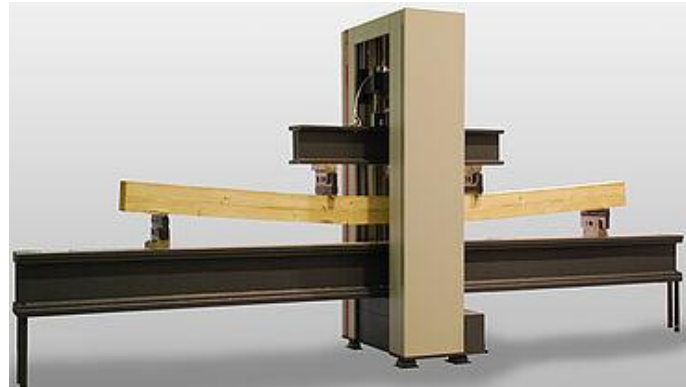


Figura 25. Ensayo destructivo de flexión en 4 puntos. ²⁵

Estos ensayos pueden emplearse en probetas libres de singularidades que, por lo general, son piezas de madera reducidas, ya que la madera de grandes dimensiones es más probable que contenga defectos naturales. Alternativamente, también las probetas a ensayar pueden tener dimensiones mayores, para simular el comportamiento de un elemento de madera que incluye imperfecciones, como nudos, bolsas de resina, etc.

Finalmente, gracias a la investigación y el desarrollo tecnológico, surgieron los ensayos no destructivos, (**END**, en inglés **NDT: Non Destructive Tests**) y ensayos cuasi no destructivos o ligeramente destructivos (**ELD**, en inglés **MDT: Minor Destructive Tests**). Estos ensayos N-MDT se emplean para determinar las propiedades físicas y mecánicas de un elemento, sin alterar o haciéndolo mínimamente, sus capacidades finales, con el objetivo de emplear la información para tomar decisiones sobre los usos más adecuados de la pieza analizada.

2.7.1.2 Propiedades características de la madera

Tras la exhaustiva investigación de las últimas décadas, se ha determinado la densidad, como uno de los parámetros más representativos de la capacidad mecánica y calidad de la madera [27]. Para cada especie de madera se debe usar como referencia su densidad básica, puesto que, de un tipo a otro de madera, esta propiedad puede oscilar entre los 300 kg/m³ (*Cecropia adenopus*) hasta los 1200 kg/m³ (*Schinopsis balansae*). No obstante, la mayoría de las maderas se encuentran en pesos secos en el rango de los 500 a 800 Kg/m³.

La humedad, por su parte, también es un factor muy relevante. A medida que aumenta la humedad interna de la madera, las capacidades resistentes y su módulo de elasticidad merman [9]. Por ello, es importante medir algunas variables como la humedad, temperatura, dirección del ensayo respecto a la orientación de las fibras, etc., para hacer una buena interpretación de los datos obtenidos.

Con algunos de estos parámetros, por ejemplo, la humedad o temperatura, es posible hacer un ajuste de los valores obtenidos en los ensayos según correcciones propuestas por las normativas. Estas correcciones provienen de métodos empíricos que permiten ajustar la información a condiciones normalizadas [28].

²⁵ Fuente:

https://www.zwickroell.com/fileadmin/_processed_/e/8/csm_DSC_3678_freigestellt_neu_798e29a0c2.jpg



2.7.1.3 Utilidad y ventajas de los N-MDT.

Las necesidades que satisfacen las técnicas de inspección no destructivos y cuasi no destructivas son dos principalmente:

- Clasificar elementos constructivos, según sus propiedades mecánicas.
- Evaluar la capacidad resistente de estructuras in situ.

Adicionalmente, los ensayos no destructivos tienen otras ventajas:

- Los equipos son portátiles y de fácil empleo.
- Se pueden realizar varios ensayos en poco tiempo.
- Permiten la toma de datos en diferentes fases constructivas: Tras la fabricación del elemento, antes de su puesta en servicio, después de esta, tras un largo periodo de tiempo en uso, al sufrir un deterioro, etc.
- Las diferentes tipologías de N-MDT se pueden emplear conjuntamente en campañas, complementándose entre ellos y ofreciendo una mejor perspectiva a la hora de realizar la interpretación de resultados [29].

Como se expuso anteriormente en el apartado 2.6 *Clasificación mecánica de los elementos de madera*, una vez realizados los diferentes ensayos para hallar las propiedades del elemento a estudiar, estos pueden ser diferenciados en varias clases resistentes.

Aunque los elementos de materia prima que llegan a una empresa que fabrica los elementos estructurales de madera ya vienen con una clasificación resistente certificada por el proveedor, esta se podría comprobar con una campaña de ensayos no destructivos, ya que estos ensayos suelen hacer mediciones indirectas de la densidad, que es uno de los requisitos fundamentales para otorgar a un elemento una clasificación resistente, junto con las propiedades de rigidez y resistencia mecánica.

2.7.1.4 Clasificaciones de los ensayos

Las técnicas no destructivas se pueden agrupar en 2 amplios grupos:

- Métodos locales:** Actúan en zonas específicas del elemento a ensayar. Estas técnicas son usualmente empleadas junto a la inspección visual para hacer una primera aproximación de las propiedades del material.
Este grupo se compone por los métodos visuales (lupa, punzón, martillo, taladro, etc.) y los ensayos mecánicos (penetrómetros electrónicos, técnicas de extracción de tornillos y otros métodos de evaluación de la dureza superficial).
- Métodos globales:** Estas metodologías recogen información de la madera en un área más amplia y por ello, nos permite hacer una mejor aproximación de las capacidades del elemento completo a estudiar.
Nos encontramos algunos ensayos como los acústicos (ultrasonidos) o dinámicos (técnicas de vibración o propagación de ondas de impacto) [28][30].

A su vez, estas técnicas se pueden clasificar según la metodología que emplean:

- **Técnicas sensoriales:** Estos métodos son los más rudimentarios y antiguos, ya que se fundamentan en la interpretación cualitativa de un experto que ejecuta el ensayo. Esta valoración puede realizarse a partir de la apreciación visual, sonora, etc.

- **Técnicas acústicas y de vibración:** Hacen referencia a aquellos ensayos en los que se emiten ondas de presión, producidas, ya sea por un transductor emisor de ondas ultrasónicas o por un martillo que provoca una vibración en el elemento de madera.
- **Técnicas electromagnéticas:** Por medio de la emisión y/o captación de ondas electromagnéticas de diferentes energías, pertenecientes a los distintos espectros de los infrarrojos, microondas, rayos X, etc.
- **Técnicas mecánicas:** Se fundamentan en aplicación de fuerzas sobre el elemento a estudiar que permiten evaluar las propiedades mecánicas del elemento ensayado. Estos ensayos son los que entran en la clasificación de cuasi no destructivos ya que, aunque suponen un daño local en el elemento, este se considera inapreciable a efectos estructurales del conjunto.

A continuación, en la **Figura 26** se muestra un diagrama en el que se hace una clasificación de los ensayo no destructivos y ligeramente destructivos de uso más frecuente, que se expondrán en este apartado.



Figura 26. Clasificación de las técnicas N-MDT aplicables en madera. (Elaboración propia)

2.7.2 Técnicas sensoriales

2.7.2.1 Inspección visual

Aunque no es una técnica que emplee ningún equipo en específico, la inspección visual es una de las metodologías más extendidas y que está sujeta incluso a las normativas UNE 56544 [25] y UNE 56546 [14], ya que, actualmente, las empresas es el método que ejecutan a la hora de categorizar en clases resistentes la materia prima que les llega, en caso de no estar certificada en origen.

Esta técnica se basa en la identificación de irregularidades como nudos, bolsas de resina, fendas, etc., además de comprobar la presencia de hongos u otros microorganismos y también deformaciones de los elementos.



Una vez comprobadas las características del elemento según los requisitos de las normas indicadas, se podrán otorgar o no las clases resistentes.

A pesar de ser una técnica muy rápida y económica, carece de objetividad y no realiza una inspección tan exhaustiva como algunas de las técnicas que se comentarán a continuación.

2.7.2.2 *Lupa o microscopio de bolsillo*

Para la observación in situ del estado de la madera de una estructura, puede ser útil el empleo de instrumentos que consigan una gran magnificación para poder observar los estados iniciales de pudriciones, los efectos de agentes destructores bióticos o incluso los mimos organismos causantes del deterioro [7].

2.7.2.3 *Endoscopio rígido o flexible*

Mediante el uso de estos instrumentos, ya sea con un endoscopio rígido (boroscopio) o con uno flexible (flexoscopio), es posible comprobar el estado del interior de un elemento de madera, introduciendo el equipo por una cavidad natural o por una perforación realizada en el elemento de estudio, de forma que podemos observar más allá de la superficie, siendo esto muy útil para identificar daños bióticos [7].

El boroscopio es un elemento metálico que alberga en su interior un sistema de lentes que proyectan la imagen hasta un ocular. Estos instrumentos suelen tener un diámetro de entre 1,9 y 10 mm y una longitud de hasta 1,5 m.

En el caso del flexoscopio, este instrumento con forma tubular se compone por una estructura de reducido diámetro, que contiene un haz de fibras óptica en su interior las cuales permiten que el aparato se pueda introducir en una trayectoria sinuosa y además tener movimiento en la punta del “tubo”. Cada una de las fibras ópticas recoge la información de un píxel, que compondrá la imagen observable en un dispositivo conectado para la visualización.

2.7.2.4 *Taladro*

En el caso del taladro, se realiza una inspección visual, pero en este caso del serrín que sale de la perforación del elemento de madera. Con ello, según el aspecto del serrín se puede sospechar que tipo de daño presenta el interior del elemento constructivo y deducir el agente destructor en cuestión.

Asimismo, durante la ejecución, la dificultad a la hora de realizar la perforación arroja información sobre la diferencia de dureza que es necesaria para avanzar con la broca y por tanto apreciar la heterogeneidad del estado de la madera.

2.7.2.5 *Punzón*

Siguiendo con los métodos sensoriales, el uso del punzón es una técnica cualitativa que se apoya en la incisión de un objeto punzante en la madera, con el objetivo de evaluar como de dura está la madera más superficial, pudiendo estar deteriorada por pudriciones o agentes xilófagos.

2.7.2.6 *Martillo*

Por su parte, una técnica para auscultar el estado interno de un elemento de madera puede ser con el empleo de un martillo sobre la madera, comprobando el sonido del impacto. Este método sirve para adquirir una primera impresión del estado general de la pieza leñosa.

2.7.3 Técnicas acústicas y de vibración

2.7.3.1 Propagación de ondas ultrasónicas

Es una de las técnicas más populares para la inspección de defectos en los materiales. En la madera se lleva empleando desde la década de 1950.

El objetivo del ensayo es medir la velocidad de transmisión de las ondas de presión que se experimenta, desde un transductor emisor hasta uno receptor **Figura 27**. Conociendo la distancia entre ambos transductores el equipo mide el tiempo de vuelo o de llegada de la onda. Con esta información se puede hallar la velocidad, que se compara con la velocidad referencia para esa especie de madera sin defectos.



Figura 27. Ensayo de ultrasonidos en madera aserrada. ²⁶

El tiempo de vuelo aumenta a medida que se encuentra con más desperfectos en el elemento, como oquedades, nudos, bolsas de resina, etc. La sensibilidad en la detección de singularidades depende del tamaño de estas respecto a la longitud de onda empleada, debiendo ser esta última más reducida que la imperfección para que se produzca una alteración en la trayectoria de la onda. [29]

Este método ofrece un coeficiente de correlación entre velocidad de propagación y el módulo de elasticidad de $0,87 < R^2 < 0,98$, y un R^2 para la densidad de alrededor de 0,8 [9][11]. Siendo estos valores del coeficiente de Pearson corroborados por campañas de ensayos en madera aserrada por medio de ensayos de ultrasonidos, contrastados con el cálculo de los mismos parámetros sometiendo los elementos a ensayos destructivos que dan lecturas más exactas.

Se tratará con mayor detenimiento y profundidad este método END en el apartado 3.2.3 *Velocidad de propagación de ultrasonidos*.

2.7.3.2 Técnicas de vibraciones inducidas

Similar a la ejecución de un ensayo de propagación de ondas ultrasónicas, lo que se mide en este caso es la velocidad de una onda provocada por un impacto en el elemento constructivo **Figura 28** [31].

A lo largo del elemento de estudio se disponen distintos acelerómetros que registran el paso de las ondas de impacto. Estos sensores se colocan a una determinada distancia del punto de impacto, para finalmente ejecutar el ensayo y registrar el tiempo que tarda la onda en llegar y con ello calcular la velocidad de propagación de la onda, que es directamente relacionable con el módulo de elasticidad dinámico y densidad de la madera [32].

²⁶ Fuente: <http://sanite.es/wp-content/uploads/2013/04/TECNICAS-ACUSTICAS.jpg>

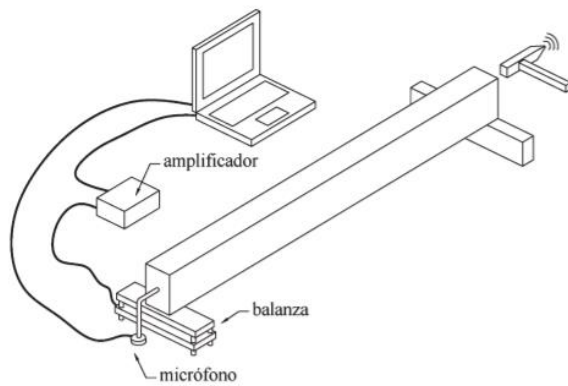


Figura 28. Ensayo de vibración en madera. ²⁷

Además de esta fuente de información, estos equipos suelen contar con un osciloscopio que mide a lo largo de tiempo, la amortiguación de la onda [29][33].

Como en el caso de los ultrasonidos, al existir un deterioro en el interior de la madera, la velocidad registrada en una especie de madera no será igual que el patrón de comparación de una muestra sana, obteniendo una velocidad más reducida de tanto en cuanto la madera presente un elevado estado de deterioro.

Con este método, se obtienen valores estadísticos de correlación del módulo de elasticidad similares a los mencionados por ultrasonidos, rondando el rango de 0,73 a 0,81 en madera de coníferas, siendo en frondosas aún más alto [11][28].

2.7.4 Técnicas electromagnéticas

2.7.4.1 Termografía

El estudio de la propagación de ondas en el espectro infrarrojo permite hacer una inspección de una estructura de madera, haciendo uso de un equipo de visión térmica como el que se observa en la **Figura 29**. La interpretación que se realiza de la estructura se hace fijándose en las zonas de los elementos de madera donde la disipación de la temperatura es más rápida o lenta que en el resto [31]. Por lo general, aquellas zonas deterioradas y que presentan cavidades y mayores niveles de humedad se comportaran con una inercia térmica mayor, ya que, el agua y el aire son dos grandes aislantes térmicos [7].

Como la conductividad de la madera está íntimamente relacionada con su densidad, podemos ver que la madera deteriorada, con una densidad mermada, se presenta en una termografía como zonas con oquedades y grandes contenidos de humedad, haciendo las condiciones de la madera propicias a experimentar daño biológico.

²⁷ Fuente: G. Íñiguez González, F. Arriaga Martitegui, M. E. Herrero, and R. Argüelles Álvarez, "Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural | Vibration methods as non-destructive tool for structural properties assessment of sawn timber," 2007.



Figura 29. Visualización de una termografía en un edificio.²⁸

2.7.4.2 Georradar

Es una técnica que emplea radiación electromagnética en el espectro de las microondas aplicable en general a las estructuras de hormigón, piedra, madera, etc.

El mecanismo gracias al que es posible ejecutar la inspección del elemento es la propagación de impulsos electromagnéticos. Estas ondas se propagan sobre el material gracias a una antena bipolar que en un extremo emite los impulsos y en otro los recibe [7].

Estos ensayos evalúan el interior del material, observando si existen irregularidades o singularidades. Esto es así, porque en la propagación de las ondas por el medio, estas son muy sensibles a interfaces con propiedades dieléctricas diferentes.

La frecuencia del ensayo es predefinida antes del ensayo, y esta dependerá del material a ensayar y de sus imperfecciones o singularidades.

En la **Ecuación 1**, observamos la ecuación de la longitud de una onda, donde λ es la longitud de onda, V la velocidad de propagación de la onda y f la frecuencia de esta.

A la hora de preestablecer la frecuencia de ensayo, se debe tener en cuenta que, si la frecuencia es muy alta, la longitud de onda será pequeña y esto provocará que el ensayo tenga una mayor resolución respecto a la identificación de interfaces de pequeño tamaño. Sin embargo, al mismo tiempo, al tener una frecuencia elevada, la atenuación de la onda es mayor.

Por otra parte, si la frecuencia elegida es demasiado alta, se da el caso contrario y a pesar de ganar una mayor longitud de evaluación, la resolución puede ser reducida.

$$\lambda = V_{onda}/f$$

Ecuación 1. Ecuación de la longitud de onda.

Estos ensayos, pueden ser de dos tipologías, por transmisión o por reflexión. Mientras que el primero de ellos se centra en las ondas que llegan a la antena receptora, que se encuentra al lado opuesto de donde se dispuso la antena emisora, el segundo de ellos registra la energía que rebota debido a las interfaces con diferentes constantes dieléctricas. Este último caso da la posibilidad de trabajar sobre un elemento únicamente necesitando acceder a una de sus caras,

²⁸ Fuente: <https://apliter.com/producto/camara-termografica-flir-e54-lente-24o/>.

lo que es útil en el caso de tratarse de un elemento de madera empotrado o perteneciente a un muro.

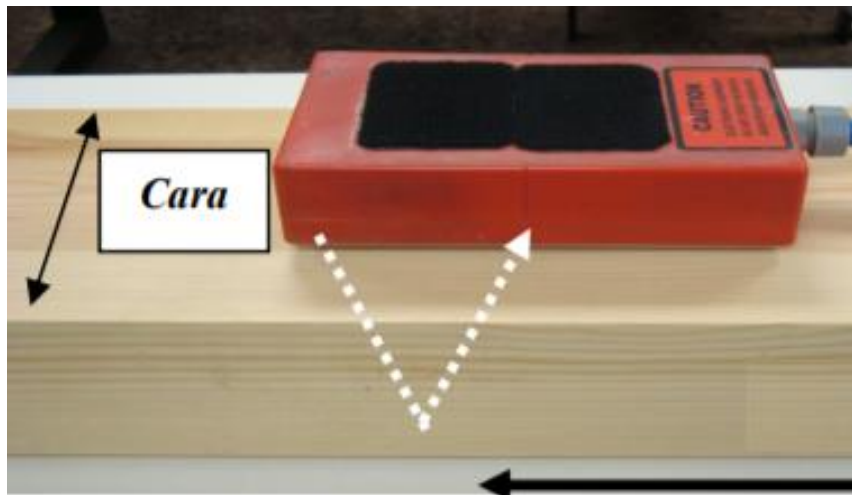


Figura 30. Ensayo de georradar de reflexión.²⁹

2.7.4.3 Atenuación de rayos X

Esta metodología es utilizada para medir el contenido de humedad de una muestra de madera.

Mediante el bombardeo de electrones contra el material, existen algunos de ellos, los que no se disipan en forma de calor, que emiten fotones de alta energía en forma de rayos X. El mecanismo que permite inspeccionar el elemento de madera es la atenuación del flujo debido a la interacción con el material. La energía del rayo incidente es, por una parte, absorbida por la madera, y la otra parte, desviada de la dirección de bombardeo de los electrones [34].

Cada elemento químico posee un coeficiente de atenuación de rayos X en función de la energía del rayo emitido. Por ello, es posible hallar la composición química y la estructura del material.

Además, este método permite diferenciar y contrastar los distintos componentes presentes en la muestra, permitiendo distinguir entre madera y agua, por ejemplo. Y con ello, se hace posible obtener un cálculo cuantitativo del contenido de humedad en una muestra de ensayo local.

2.7.4.4 Tomografía por rayos X

Por otro lado, otra utilidad de la emisión de radiación de rayos X, es la ejecución de tomografías de elementos de madera. En esencia se trata de la inspección de secciones o cortes de un objeto, gracias a la reconstrucción de una imagen con un ordenador a partir de la información registrada de los haces de energía atenuados y desviados que se proyectan por una fuente emisora que se mueve completando giros completos alrededor de la muestra [35].

2.7.5 Técnicas mecánicas o cuasi no destructivas

2.7.5.1 Extracción de tornillos

Este ensayo mide la fuerza necesaria para ejecutar el arranque de un tornillo que se ha introducido en el elemento de madera previamente **Figura 31**. Los tornillos tienen unas dimensiones de 4mm de diámetro y 18 mm de largo [28][36].

²⁹ Fuente: I. Rodríguez Abad, "Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera." Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2009.



Figura 31. Máquina de extracción de tornillos. ³⁰

De estos ensayos se pueden obtener correlaciones entre la densidad y la fuerza que mide el instrumento para el arranque del tornillo, un ejemplo de ello es la correlación experimental de la **Ecuación 2**, donde la densidad se expresa en g/cm³ y la fuerza de arranque en KN. Esta técnica también es útil para detectar defectos o deterioros en las cercanías de la zona ensayada.

$$Densidad = \frac{1}{0,93 + \frac{2,47}{Fuerza\ de\ arranque}}$$

Ecuación 2. Extracción de tornillos. Correlación densidad – fuerza de arranque. ³¹

En este caso, el coeficiente de correlación respecto a la determinación del módulo de elasticidad se encuentra entre 0,49 y 0,74 [37].

2.7.5.2 Core-drilling o Extracción de probetas de reducido diámetro

Esta metodología emplea la extracción de muestras del elemento de madera con el objetivo de hacer mediciones sobre la densidad y el contenido de humedad. También permite determinar la especie de madera en el caso de no tener registro de esta o incluso inspeccionar si existe o no daño biótico en el interior del elemento.

El proceso de extracción de la muestra se muestra en la **Figura 32**. El ensayo empieza con la ejecución de una perforación con una broca hueca de un diámetro interno de unos 20 mm, que puede penetrar a una profundidad de alrededor de 60 mm. Tras la ejecución del taladro, la probeta queda débilmente unida al fondo de la perforación, pudiéndola sacar rompiéndola con un elemento, tipo destornillador, por la parte final del testigo.

³⁰ Fuente: G. Íñiguez González, “Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural.” Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2007.

³¹ Fuente: L. A. Basterra, L. Acuña, M. Casado, G. Ramón-Cueto, and G. López, “Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: aplicación a la Plaza Mayor de Chinchón,” Inf. la Constr., vol. 61, no. 516, pp. 21–36, 2009, doi: 10.3989/ic.09.016.

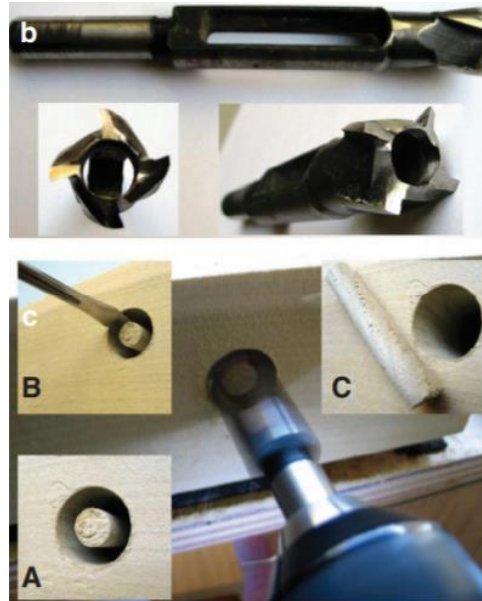


Figura 32. Fases de la ejecución de un ensayo de core drilling.³²

Una vez se ha obtenido la probeta, se rectifica la parte final de esta para trabajar con un cilindro regular. Con ella es posible calcular la densidad del elemento de la estructura de madera, también la humedad tras secar la probeta en estufa y por supuesto nos permite inspeccionar visualmente el interior del elemento al que le hemos hecho la perforación.

Puesto que este ensayo deja una cavidad en el elemento de construcción de alrededor de 40 mm de diámetro, que, aunque en un elemento de, por ejemplo, de sección cuadrada de 400 x 400 mm no es tan dañino, se aconseja introducir una pieza de madera y sellarla, de manera que este aporte material que contribuye a los esfuerzos de solicitación, pero también evita la acumulación de humedad y la desprotección del interior del elemento frente a ataques de organismos xilófagos.

Cabe mencionar que este económico y rápido ensayo tiene muy buenos coeficientes de correlación de densidad, sobre el 0,98, a cambio de realizar un ensayo más intrusivo que los que se comentan en este apartado [38].

2.7.5.3 Tensión micro-espécimen

Esta metodología examina las propiedades mecánicas de un elemento de madera a partir de la extracción bajo tensión de una muestra de pequeño diámetro (unos 5 mm), en sentido radial. Se emplea un instrumento capaz de arrancar el testigo de madera registrando la fuerza de arranque ejercida en el momento de la rotura [31].

Con ello, es posible calcular el módulo de elasticidad en la dirección de ejecución del ensayo, respecto a la orientación de las fibras.

2.7.5.4 Penetrometría

Nacieron con el objetivo de comprobar el grado de pudrición en postes telefónicos en Suiza.

Los ensayos con penetrómetros miden la profundidad de penetración de un elemento, de algunos milímetros de diámetro, que se proyecta con una energía constante gracias a la ayuda

³² Fuente: I. Bobadilla, R. D. Martínez, M. Esteban, and D. F. Llana, "Estimation of wood density by the core drilling technique," *Holzforschung*, vol. 72, no. 12, pp. 1051–1056, 2018, doi: 10.1515/hf-2018-0036.

de un muelle dinamométrico (**Figura 33**) Estos datos son relacionables con la densidad de la madera que ha penetrado, a mayor densidad, menor penetración de la barra proyectable [39].



Figura 33. Penetrómetro PILODYN. ³³

Sin embargo, el ensayo no proporciona información sobre el interior del elemento, el análisis se limita a 2-4 cm de profundidad, por eso, es conveniente, si el ensayo se va a realizar sobre un árbol vivo, quitar una porción de corteza de este [40].

Algunos equipos como el Pilodyn, proporcionan un coeficiente de determinación R^2 desde un 0,31 hasta 0,39, aunque se han llegado a valores de $R^2 = 0,61$ para una especie de pino y una muestra suficientemente grande [37].

2.7.5.5 Resistografía

El inventor de este instrumento es Frank Rinn, propietario de la marca de equipos para ensayos no destructivos en la madera Rinntech, diseñó en 1986 este artilugio para determinar el estado de conservación y analizar la degradación en postes de madera. El nombre original del equipo era “Densiomat” y más tarde, en 1993 se empezó a nombrar como resistógrafo [41].

El ensayo consiste en un equipo con una broca de diámetro de entre 1,5 y 3 mm que ejecuta un taladro **Figura 34**, registrando al mismo tiempo los valores de consumo de potencia, gracias a un potenciómetro conectado al motor eléctrico para mantener constantes la velocidad de avance y la velocidad de rotación de la broca, que aumentan tanto como la resistencia a la perforación de la madera lo haga. Debido a la dimensión del taladro, se considera que no ofrece daños a la estructura. Algunos autores la clasifican como técnica no destructiva.



Figura 34. Ejecución de un ensayo resistográfico en el pie de un árbol. ³⁴

³³ Fuente: <http://www.gisiberica.com/equipos%20de%20control%20de%20calidad/QC400.html>

³⁴ Fuente: <http://www.rinntech.de/content/view/8/34/lang,english/index.html>



En la actualidad, este método es de gran interés para el diagnóstico de estructuras de madera en las zonas de empotramiento que quedan ocultas a la inspección visual y no muestran síntomas de degradación.

El inventor del resistógrafo, Frank Rinn, menciona en uno de sus artículos un coeficiente de correlación con la densidad muy elevado de 0,9429 [42]. Mientras que en otros estudios, se puede encontrar R^2 más realistas, tratándose de un material tan heterogéneo como la madera, de entre 0,7 y 0,8 para madera con ausencia de defectos [11][43] o incluso menos precisos de entre 0,55 y 0,85 [28]. Por tanto, puede concluirse que estos ensayos no destructivos obtienen resultados con diversos coeficientes de correlación. La exactitud del método puede depender de la especie de madera, formato de madera sobre el que se está haciendo el ensayo, etc.

El ensayo, a pesar de ejecutarse en un punto concreto, examina toda la profundidad de la perforación. Para obtener una mejor interpretación de los datos, lo que suele hacerse es emplear varias técnicas END en la misma campaña y de esta forma obtener mejores estimaciones de las propiedades. Un ejemplo de esta complementación es el empleo conjunto de técnicas resistográficas y ensayos de ultrasonidos para evaluar la capacidad de la madera aserrada quemada [11].

Se tratará con mayor detenimiento y profundidad este método ligeramente destructivo en el apartado 3.2.4 *Resistografía*.

2.7.6 Otros

2.7.6.1 Xilohigrometría

Este método no destructivo efectúa una medición indirecta de la humedad gracias a la corriente eléctrica que emite una de las puntas clavadas en el elemento, actuando la otra como receptor. En el proceso la corriente atraviesa la madera entre ambas. La humedad se obtiene a partir de la resistencia eléctrica que opone el medio a ser atravesado.

Este procedimiento se ve afectado por una serie de factores como la especie de madera, su densidad, la dirección de medición respecto a los anillos de crecimiento de la madera o la temperatura. Con la intención de restar incertidumbres el equipo permite fijar los parámetros de corrección que más afectan: la temperatura ambiente y la especie.

2.7.6.2 Comparación de patrones de ruido

El empleo de un instrumento para la detección de actividad de organismos xilófagos se suele realizar para comprobar si la estructura de madera está siendo atacada por organismos. Este método de inspección se basa en colocar dos palpadores piezo-eléctricos capaces de captar el sonido producido por los seres vivos dentro de la madera (insectos generalmente).

Esta grabación es transferida a un software de comparación (**Figura 35**) que amplía la grabación y hace la comparación con los sonidos patrón de diferentes insectos de su librería de sonidos.

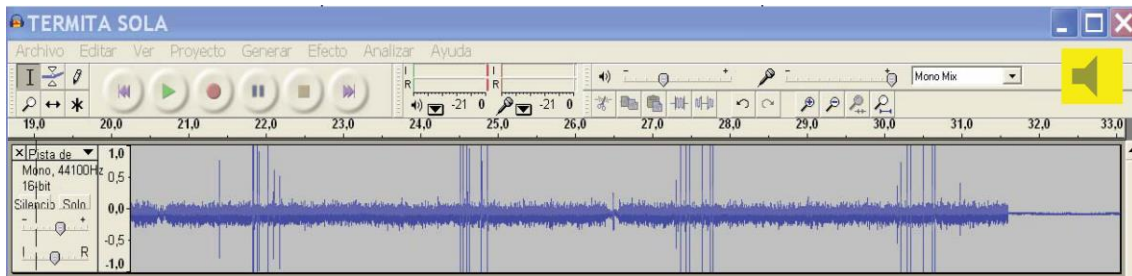


Figura 35. Software de comparación de los sonidos. ³⁵

2.7.7 Resumen de las metodologías END y ELD

Según lo que se ha expuesto en los apartados anteriores, es apreciable que cada ensayo permite conocer una propiedad de la madera, permitiendo deducir que, para hacer un buen diagnóstico de un elemento de madera, lo más apropiado es realizar una campaña de ensayos empleando varios de ellos.

En la siguiente **Tabla 2** se pueden observar los parámetros que miden estos ensayos END y ELD y las variables de la madera con las que están relacionados.

³⁵ Fuente: Apuntes didácticos G1183 – Patología y Rehabilitación de la Edificación.



Tabla 2. END y ELD para madera. Parámetros de medición y relacionables (Elaboración propia)

Tipo de técnica	Ensayo	Parámetro medible	Parámetro relacionable
Sensoriales	Inspección visual	Presencia de singularidades o daño biótico	Merma de capacidades mecánicas
	Lupa o microscopio		
	Endoscopio		
	Taladro	Resistencia al perforado Aspecto del serrín	Deterioro interno
	Punzón	Dureza en profundidad	
	Martillo	Sonido	
Acústicas y de vibración	Propagación de ondas ultrasónicas	Velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas	Densidad Módulo de elasticidad dinámico Detección de singularidades
	Vibraciones inducidas	Velocidad de propagación de las ondas de impacto	Módulo de elasticidad
Electromagnética	Termografía	Visualización radiaciones infrarrojas	Identificación de cavidades, zonas de humedad y otras interfases
	Georradar	Transmisión o reflexión de ondas de microondas	
	Atenuación de rayos X	Captación de ondas de rayos X	Contenido de humedad y otras interfases
	Tomografía por rayos X	Captación de ondas de rayos X	Reconstrucción de secciones del elemento
Mecánicas	Extracción de tornillos	Fuerza de arranque del tornillo	Densidad
	Core drilling	Obtención de testigo para hacer ensayos de densidad, humedad e inspección visual	
	Tensión micro - espécimen	Fuerza de arranque del testigo	Módulo de elasticidad
	Penetrometría	Profundidad de penetración	Densidad superficial
	Resistografía	Amplitud resistográfica (Resistencia a la perforación)	Densidad
	Xilohigrometría	Resistencia eléctrica	Contenido de humedad
Otras técnicas	Comparación de patrones de ruido	Ruido de organismos	Especie de xilófago



Capítulo 3

Campaña de ensayos en laboratorio

3.1 Marco normativo

3.2 Descripción de ensayos

3.3 Marco experimental

3 Campaña de ensayos en laboratorio

3.1 Marco normativo

La inspección de los elementos se ha realizado con el objetivo de obtener información sobre la práctica de ensayos no destructivos y ligeramente destructivos en los elementos de las vigas de madera laminada encolada, proporcionadas por la empresa Yofra S.A.

Para cada uno de los ensayos realizados, se han seguido las pautas de las normas UNE especificadas por AENOR.

A continuación, se relacionan todas las normas que se han revisado. Posteriormente, se describen en más detalle las diferentes fases del estudio y las normativas que resultan de aplicación.

3.1.1 Normas revisadas

- *UNE EN 338: Madera estructural. Clases resistentes.* 2017. [26]
- *UNE EN 384: Madera estructural determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.* 2020. [44]
- *CTE: DB SE-M. Documento Básico Seguridad Estructural - Madera.* 2019. [4]
- *UNE EN 408: Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.* 2019. [45]
- *UNE EN 13183-1: Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Determinación por el método de secado en estufa.* 2019. [46]
- *UNE-EN 13183-2: 2002. "Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica".* [47]

3.1.2 Normas por fases del estudio

3.1.2.1 Clases resistentes

- ***UNE EN 338: Madera estructural. Clases resistentes.* 2017.**

Esta normativa agrupa los elementos de madera aserrada según sus características mecánicas (resistencia, rigidez y densidad) como se observa en la **Figura 36**. Son objeto de esta norma, aquellos elementos fabricados a partir de maderas de especies coníferas y frondosas de uso estructural indicados en la norma EN 14081-1. [46]

En ella se agrupan los elementos de madera aserrada según sus características de resistencia, rigidez y valores de densidad. Son objeto de esta norma, aquellos elementos fabricados a partir de maderas de especies coníferas y frondosas de uso estructural indicados en la norma EN 14081-1.

- ***CTE: DB SE-M. Documento Básico Seguridad Estructural - Madera: Anejo D.* 2019.**

Los elementos de madera laminada proporcionados por la empresa Yofra S.A. siguen el criterio de clasificación resistente de acuerdo al Código Técnico de la Edificación. En este se indican las clases resistentes otorgadas a los elementos de madera laminada, directamente relacionadas con las clases resistentes, según la norma UNE- EN 338 [26], de las diferentes láminas de madera aserrada que componen el elemento (**Figura 37**).

	Clase	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propiedades de resistencia en N/mm²													
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción paralela a la fibra	$f_{t,0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	22,5	26	30	33,5
Tracción perpendicular a la fibra	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compresión paralela a la fibra	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
Compresión perpendicular a la fibra	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0
Cortante	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propiedades de rigidez en kN/mm²													
Módulo de elasticidad medio en flexión paralela a la fibra	$E_{m,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
Módulo de elasticidad característico en flexión paralela a la fibra (5% percentil)	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,1	10,7
Módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo de cortante medio	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad en kg/m³													
Densidad característica (5% percentil)	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Densidad media	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520
<p>NOTA 1 Los valores dados en esta tabla para la resistencia a tracción, resistencia a compresión, resistencia a cortante, módulo de elasticidad característico en flexión, módulo de elasticidad transversal medio y módulo de cortante medio se han calculado utilizando las ecuaciones dadas en la Norma EN 384.</p> <p>NOTA 2 Los valores de resistencia a tracción se han estimado de forma conservadora teniendo en cuenta que la clasificación se ha realizado partiendo de la resistencia a flexión.</p> <p>NOTA 3 Las propiedades relacionadas en esta tabla son aplicables a la madera que presente un contenido de humedad que corresponde a una temperatura de 20 °C y una humedad relativa del 65%, lo que equivale a un contenido de humedad del 12% para la mayor parte de las especies.</p> <p>NOTA 4 Los valores característicos de resistencia a cortante son para madera sin fendas, de acuerdo a la Norma EN 408.</p> <p>NOTA 5 Las clases pueden aplicarse también a maderas frondosas que presenten un perfil resistente y densidad similares, tales como el chopo o el castaño.</p> <p>NOTA 6 La resistencia a la flexión de canto puede utilizarse también en el caso de flexión de tabla.</p>													

Figura 36. UNE-EN 338: 2017. Propiedades físicas y mecánicas según la clase resistente en madera aserrada.

	Clases resistentes		
Madera laminada encolada homogénea	GL24h	GL28h	GL32h
- Todas las láminas	C24	C30	C40
Madera laminada encolada combinada	GL24c	GL28c	GL32c
- Láminas externas ⁽¹⁾	C24	C30	C40
- Láminas internas	C18	C24	C30

(1) Los requisitos se aplican al sexto del canto extremo de cada lado con un mínimo de 2 láminas.

Figura 37. CTE DB SE-M. Clases resistentes para madera laminada encolada.

3.1.2.2 Obtención de las probetas

Para la obtención de las probetas, se ha de tener en cuenta los ensayos que se van a realizar durante las diferentes campañas y la morfología que exigen las diferentes normas.

- **UNE EN 13183-1: Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Determinación por el método de secado en estufa. 2019.**

Las muestras deben obtenerse de toda la sección del elemento de madera, **Figura 38**, con un grosor mínimo de 20 mm en la dirección de la fibra y a 300 mm de distancia de los extremos de la pieza. Estas piezas no deben incluir singularidades ni defectos.

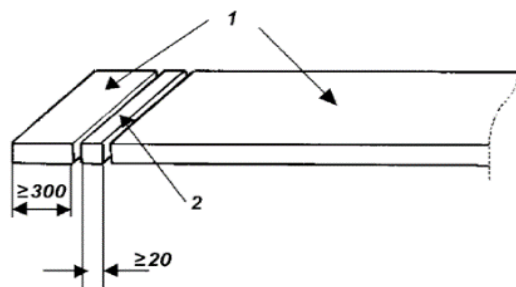


Fig. 1 – Posición de la muestra

Leyenda
1 Pieza sometida a ensayo
2 Muestra"

Figura 38. UNE-EN 13183-1:2019. Croquis extracción de probetas para cálculo de humedad en estufa.



- **UNE EN 408: Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. 2019.**

Para la determinación de la densidad, lo que se indica en la norma es la obtención de probetas de sección transversal completa del elemento, estando estas libres de defectos de cualquier tipo.

3.1.2.3 Acondicionamiento de las probetas

- **UNE EN 408: Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. 2019.**

La normativa tipifica el acondicionamiento al que se deben someter las probetas previo a la realización de los ensayos. La norma es aplicable para elementos de madera maciza y madera laminada encolada, de sección constante rectangular o circular.

La atmosfera, en donde se deben acondicionarse las piezas de madera, debe mantenerse a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $65 \pm 5\%$. La muestra se considera acondicionada una vez alcanza una masa constante, considerándose como tal, cuando dos pesadas sucesivas, en un intervalo de 6 horas, su peso no difiera en más de un 0,1%.

Las probetas se retirarán como máximo 1 hora antes de los ensayos.

3.1.2.4 Determinación de las medidas de la probeta

- **UNE EN 408: Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. 2019.**

Esta norma es aplicable para elementos de madera maciza y madera laminada encolada, de sección constante rectangular o circular.

Las probetas se medirán con precisión del 1% estando previamente acondicionadas. Si la anchura o el grosor varía en una probeta, se obtendrá de la media de 3 mediciones a lo largo de la probeta.

3.1.2.5 Humedad de la probeta

- **UNE EN 13183-1: Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Determinación por el método de secado en estufa. 2019.**

Para las pesadas de la masa de la probeta, si se prevé la obtención de piezas en estado anhidro de más de 100 g, se debe hacer uso de una balanza con una precisión de 0,1 g. Para el secado se indica el uso de un equipo de secado con circulación de aire en su interior y que mantenga una temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$.

La humedad se expresa con una aproximación del 0,1% y se calcula con la **Ecuación 3**, donde ω es la humedad, m_1 es el peso antes del secado y m_0 es el peso tras el secado.

$$\omega(\%) = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

Ecuación 3. Contenido de humedad de la madera.

La probeta se considera acondicionada cuando alcanza una masa constante. Esta condición se da cuando entre dos pesadas sucesivas, en un intervalo de 2 horas, el peso no difiere en más de un 0,1%.

- **UNE EN 13183-2: Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Estimación por el método de la resistencia eléctrica. 2002.** [47]

Este método es apto para madera con un contenido de humedad aproximada de entre el 7% y 30%. El instrumento especificado es un xilohigrómetro de resistencia eléctrica con electrodos aislados. Debe estar graduado en fracciones de menos del 1%, hasta un máximo de humedad 30%. También, debe tener un sistema de regulación o tablas para efectuar correcciones en función de la especie de madera y la temperatura.

La normativa establece que la medición se realizará en sentido paralelo o perpendicular a las fibras, en un punto que diste al menos 300 mm de los extremos de la pieza y una distancia mayor de 0,3 veces la anchura (w), penetrando a una profundidad de al menos 0,3 veces el espesor (t) de la pieza (**Figura 39**).

Finalmente, la lectura se realiza tras 2 o 3 segundos, expresándolo con aproximación del 1%.

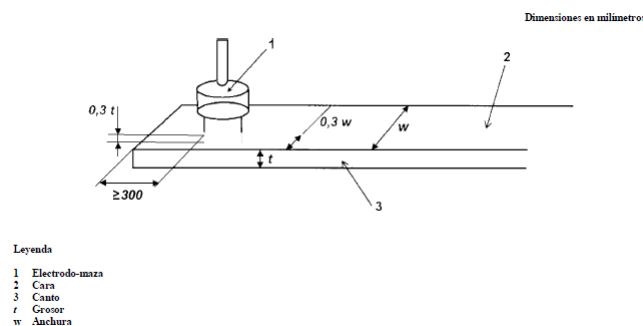


Figura 39. UNE-EN 13183-2: 2002. Croquis medición de humedad por método de resistencia eléctrica.

3.2 Descripción de ensayos

3.2.1 Medición de la humedad con xilohigrómetro

Este método no destructivo, efectúa una medición indirecta de la humedad gracias a la corriente eléctrica que emite una de las puntas clavadas en el elemento, actuando la otra como receptor. En el proceso la corriente atraviesa la madera entre ambas. La humedad se obtiene a partir de la resistencia eléctrica que opone el medio a ser atravesado.

Este procedimiento se ve afectado por una serie de factores como la especie de madera, su densidad, la dirección de medición respecto a los anillos de crecimiento de la madera o la temperatura. Con la intención de restar incertidumbres el equipo permite fijar los parámetros de corrección que más afectan: la temperatura ambiente y la especie.

3.2.2 Medición de humedad en la estufa

La obtención de la humedad por el método de la estufa se realiza con un equipo de secado con circulación de aire en su interior y que garantice una temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Se ejecutan mediciones del peso cada 2 horas hasta que la diferencia gravimétrica no supera el 0,1% (**Ecuación 3**). Entonces, se considera que la pieza de madera ha alcanzado el estado anhidro. Las

pesadas se ejecutarán con una balanza de precisión con aproximación de 0,1 g para probetas de más de 100 g.

3.2.3 Velocidad de propagación de ultrasonidos

Este tipo de inspección es uno de los primeros que se desarrollaron para la madera y está incluido en las técnicas acústicas de inspección no destructiva. La finalidad del ensayo es comparar la velocidad de propagación experimentada en un material sin defectos, con la que obtenemos en nuestro elemento de madera para detectar posibles daños en la muestra.

El equipo emite ondas con una frecuencia determinada dependiendo del material a ensayar, para la madera estas frecuencias oscilan habitualmente entre los 20 y 50 kHz. La frecuencia mínima, 20 kHz corresponde a una longitud de onda de 20 cm, mientras que para más elevadas frecuencias se va reduciendo progresivamente.

La frecuencia está inversamente relacionada con la longitud de onda. Estos parámetros se determinan antes del ensayo, de acuerdo con el tamaño de las imperfecciones o singularidades que se pueden presentar. Idealmente, la longitud de onda debe ser más pequeña que las singularidades que se desean identificar, ya que de esta forma se asegura que la onda no posee una longitud suficiente como para atravesar la imperfección sin ser detectada.

Las ondas de presión producidas por el equipo de ultrasonidos son especialmente sensibles a interfases con aire, como oquedades, grietas, fisuras, acebolladuras, fendas, etc. pero también se registran variaciones en los datos al atravesar bolsas de resina, nudos, degradaciones del material, etc. Generalmente la velocidad de propagación obtenida aumentará con la densidad (siempre y cuando suponga un incremento más significativo que el experimentado por la rigidez), y disminuirá cuando se encuentren oquedades o bajas densidades causadas por el deterioro de la madera. La **Ecuación 4** explica lo anterior, siendo V_p la velocidad de propagación, E el módulo de elasticidad, ν el coeficiente de Poisson y ρ la densidad de la madera.

$$V_p = \sqrt{\frac{E (1 - \nu)}{\rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

Ecuación 4. Velocidad de propagación.

Las velocidades de transmisión de las ondas ultrasónicas son sensibles a algunos factores externos como la temperatura, la humedad e incluso el nivel de tensión del elemento en el que se ejecuta la medición. Por esta razón, frecuentemente, se suele hacer una corrección de los datos en función de la temperatura y humedad. Este último, se estima que por cada incremento de un 1% de humedad respecto a la estándar para madera de uso estructural (12%), la velocidad de propagación se reduce un 0,8%, en un rango de humedad de entre 5 y 30%. [48]

Se debe prestar atención a la atenuación de la señal emitida durante el tiempo de vuelo. Este factor se puede minimizar disminuyendo la frecuencia emitida o, dicho de otra forma, aumentando la longitud de onda. De esta manera, conseguimos inspecciones para elementos de gran longitud con una atenuación mínima, pero la sensibilidad frente a la posible detección de singularidades decrece en igual medida. Se hace por tanto necesario un estudio para garantizar un adecuado balance entre las dos variables.

Adicionalmente, es importante contemplar el ángulo de la trayectoria de las ondas respecto a la orientación de las fibras, puesto que al ser la madera un material intrínsecamente anisótropo en su composición, la propagación de las ondas varía notablemente.

Atendiendo a la disposición de los transductores, existen 3 tipos de configuraciones:

- **Directo:** Los palpadores se colocan en caras opuestas (**Figura 40**).
- **Semidirecto:** El emisor y receptor se colocan en caras adyacentes.
- **Indirecto:** Los dos palpadores se encuentran en la misma superficie.



Figura 40. Ensayo de ultrasonidos directo en madera aserrada. (Fuente propia)

Mientras que para los ensayos directo y semidirecto la velocidad se calcula con la distancia entre transductores y el tiempo de vuelo, para el indirecto se deben realizar varias mediciones a distancias diferentes y ajustar los datos obtenidos a una recta de pendiente ϕ , cuya tangente es la velocidad de propagación en el medio.

Corroborado por trabajos previos [9] basados en campañas experimentales, se afirma que hay una correlación entre la velocidad de propagación de ultrasonidos con el módulo de elasticidad dinámico (**MOE**) del material ensayado, diferente del módulo de elasticidad estático, atendiendo a la **Ecuación 5**, donde E_{din} es el MOE, ρ la densidad y V la velocidad de propagación.

$$E_{din} = \rho \cdot V^2$$

Ecuación 5. Módulo de elasticidad dinámico.

Para maderas aserradas, las correlaciones lineales entre la velocidad de propagación en dirección longitudinal y el módulo de elasticidad dinámico, proporcionan estimaciones con un coeficiente de determinación entre 0,45 y 0,75.

3.2.4 Resistografía

Este ensayo, se fundamenta en la medición de la resistencia que un elemento ofrece a ser perforado. Puesto que las dimensiones de la broca con la que se ejecuta el taladro son milimétricas, los daños provocados al elemento pueden considerarse despreciables. Debido a este hecho, se puede considerar la resistografía dentro de los métodos de inspección ligeramente destructivos.

El método es de gran ayuda para el diagnóstico de estructuras de madera en las zonas de difícil inspección, como en el caso de la **Figura 41**, que quedan ocultas y no muestran síntomas de degradación.



Figura 41. Ensayo resistográfico in situ para la comprobación del estado de deterioro de la madera de un árbol. ³⁶

La metodología del resistógrafo consiste en la realización de una perforación con una broca de acero, extremadamente fina y esbelta, de entre 1,5 y 3 mm de diámetro de gran longitud. El taladro se realiza a velocidad de rotación y avance constantes, establecidas con anterioridad a la ejecución del ensayo.

El equipo, registra la resistencia a la perforación, en términos porcentuales del consumo de potencia suministrada al equipo gracias al potenciómetro conectado al motor eléctrico del equipo. Esta magnitud medible es también llamada por algunos autores amplitud resistográfica. [11] [43] El resistógrafo registra información cada 0,01 cm, siendo en la práctica un registro continuo a lo largo de toda la perforación.

Esta elevada cadencia de adquisición de datos conlleva una lectura que ofrece una mínima pérdida de información, permitiendo una resolución bastante precisa, incluso pueden observarse los anillos de crecimiento de la madera, apreciando la madera de otoño (más densa) y la madera de primavera (menos densa). Esta particularidad del material es lo que provoca que el gráfico obtenido tenga una forma de sierra.

En la primera generación de resistógrafos, las medidas que se efectuaron eran las correspondientes a la “drill force” en cada punto conformando el perfil de perforación. Este perfil representa la cantidad de potencia consumida por el equipo para mantener constante la velocidad de giro de la broca.

En los últimos equipos, se ha incluido una nueva variable que complementa la interpretación de los datos, la “feed force”. Esta variable enfrentada a la longitud perforada compone el perfil de avance. Este perfil representa la cantidad de potencia consumida por el equipo para mantener constante la velocidad de avance longitudinal de la broca.

Este nuevo parámetro ha sido añadido con la finalidad de evaluar el confinamiento que sufre la broca en perforaciones de gran longitud. Este hecho es provocado por el material suelto que

³⁶ Fuente: <https://www.iml-service.com/wp-content/uploads/2013/08/Olivenbaumkontrolle-mit-dem-IML-PowerDrill-1000x658.jpg>

queda atrapado dentro de la cavidad de la perforación, aprisionando el fuste y ofreciendo una resistencia adicional al giro, creada por la fricción.

En el caso de la resistencia al avance no ocurre lo mismo, ya que únicamente se ve afectada por la resistencia que opone el material a ser perforado. En base a lo explicado anteriormente, la presencia de una cavidad en la madera será más fácilmente detectable en el gráfico de avance que en el de perforación.

Las lecturas obtenidas por el equipo, para ambas curvas, serán bajas en zonas donde la madera es menos densa o existe algún tipo de daño o defecto, y altas donde la madera sea densa o con presencia de singularidades como nudos.

3.3 Marco experimental

3.3.1 Descripción General

Para el desarrollo de la campaña experimental se seleccionaron vigas que difieren en la especie, tratamiento y clase resistente. La **Tabla 3** recoge los 10 elementos estudiados:

Tabla 3. Nomenclatura de las probetas clasificadas por especie y clase resistente.

	Pino Silvestre Tanalizado	Pino Silvestre	Abeto
GL 18	D038 (BIS)	D069 (BIS)	D041, D048 (BIS), D048 (BIS 2), D049
GL 24	D026	D075 (BIS)	D054, D055

3.3.1.1 Obtención de las probetas

Siguiendo las indicaciones de la normativa UNE EN 13183-1 [46], se han sacado rebanadas de sección completa de las vigas de madera laminada a una distancia de al menos 300 mm de los extremos y espesor medio de 30 mm.

Una vez calculada la luz libre de cada uno de los 10 especímenes, se seleccionó la menor y se plantearon alternativas.

Dado que el espesor mínimo de cada rebanada debe ser de 20 mm se convino que 5 testigos era el número adecuado, puesto que 4 dejaría demasiada distancia entre ellas, perdiendo información y 6 demasiado poco, dando información muy similar.

La **Figura 42** muestra una de las probetas en el momento previo al corte para la obtención de las rebanadas. Se observan perfectamente las 5 rebanadas, equidistantes entre sí, y las distancias exigidas a ambos extremos. El corte se ha ejecutado con una sierra de disco y posteriormente para una mejor visualización de la sección transversal, se ha hecho un desbaste con una lijadora de banda.



Figura 42. Viga de madera laminada encolada. Pino silvestre tanalizado - GL18 - 5 láminas. (Fuente propia)

3.3.1.2 Acondicionamiento

El acondicionamiento de las probetas se ha llevado a cabo en una cámara climática manteniendo la humedad al **65%** y la temperatura a **20°C**, con el fin de alcanzar una humedad interna de equilibrio en la madera (aproximadamente el 12%). Este valor es el considerado normalizado según norma para maderas de uso estructural, y al que se corregirán el resto de los parámetros. La determinación de estas condiciones se ha hecho usando el ábaco de Kollman (**Figura 43**).

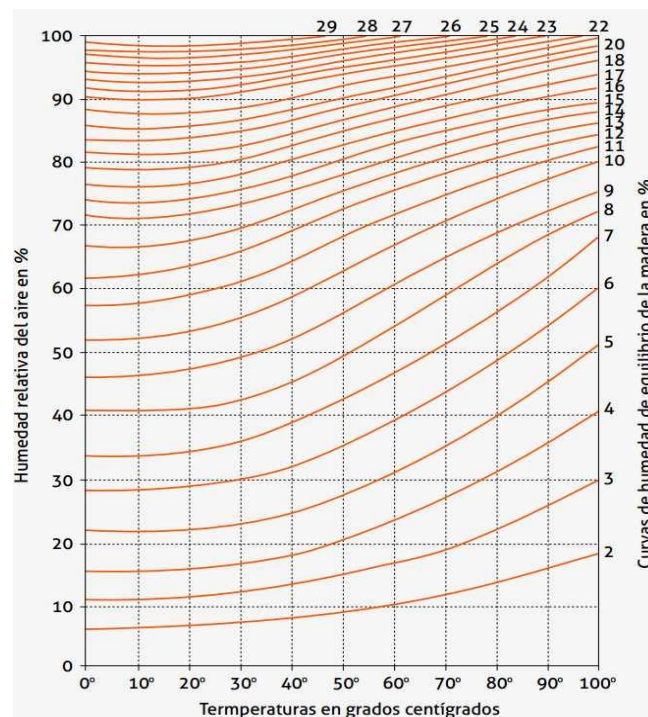


Figura 43. Ábaco Temperatura-Humedad Kollman madera.³⁷

Las probetas se han mantenido acondicionado en la cámara climática (**Figura 44**) hasta que la variación entre dos pesadas consecutivas con una diferencia de 6 horas ha sido igual o inferior al 0,1%. Tras cumplirse esta condición, se sacaron las probetas en lotes de 10 para no perder las condiciones de acondicionamiento conseguidas.

³⁷ Fuente: <https://www.zuraparket.com/wp-content/uploads/2019/05/abaco-de-kollman-1.jpg>



Figura 44. Cámara de acondicionamiento a 20°C y 65% de humedad con circulación de aire interna. (Fuente propia)

3.3.1.3 Medición de las dimensiones de las probetas

Calibre marca Kalkum 300 mm, sensibilidad 0,01 mm.

La medición de las 3 dimensiones de las probetas se ejecutó con un calibre digital (**Figura 45**) con una precisión de 0,01 mm. Igualmente, todas las probetas fueron escaneadas para obtener las dimensiones exactas con AutoCAD en caso de existir algún desperfecto.

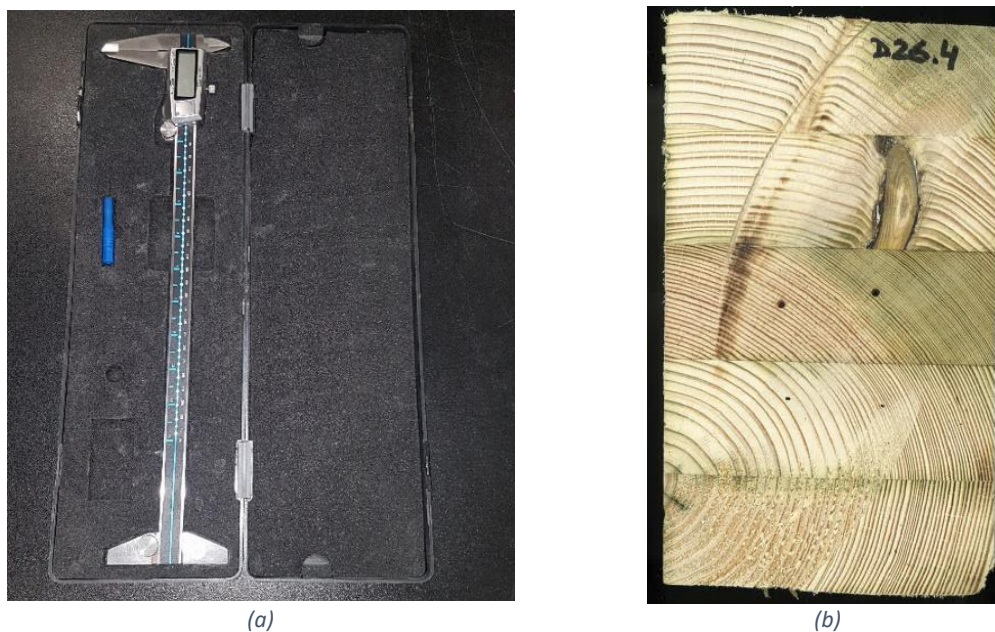


Figura 45. (a) Calibre marca Kalkum 300 mm. (b) Ejemplo de probeta escaneada. (Fuente propia)

3.3.1.4 Medición de humedad con xilohigrómetro

Xilohigrómetro marca GANN, modelo Hydromette RTU 600, precisión del 0,5%.

Previo a la ejecución de la medida del contenido de humedad es necesario fijar los parámetros de corrección del equipo referentes a la temperatura ambiente (con intervalos de 5°C) y la especie de la madera (factores correctivos X, Y proporcionados por el fabricante) **Figura 46 a**).

La hinca de las puntas del xilohigrómetro en el centro de la probeta se realiza con la ayuda de la maza deslizante del equipo, cumpliendo las especificaciones de la norma hasta una profundidad aproximada de 15mm, **Figura 46 b).**

La lectura se recoge, cuando el valor se estabiliza, normalmente pasados 2 o 3 segundos.



(a)



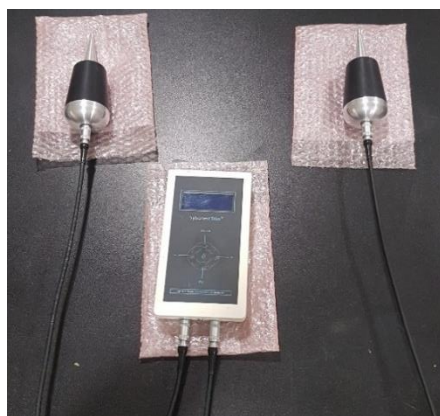
(b)

Figura 46. Xilohigrómetro marca GANN a) Equipo conectado. b) Realización de lectura en madera laminada encolada. (Fuente propia)

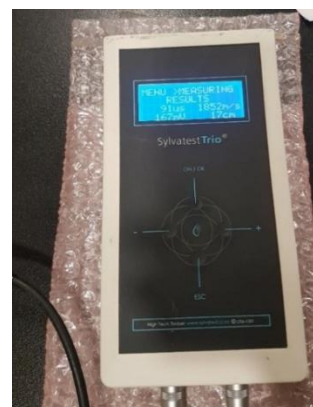
3.3.1.5 Ensayo de propagación de ultrasonidos

Equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio. Frecuencia 22 KHz.

Previo a la realización del ensayo, con el equipo de ultrasonidos **Figura 47 a)**, se deben ejecutar unas pequeñas perforaciones (**Figura 48**) en los cantos de las piezas para garantizar el correcto acoplamiento de los transductores. Dado que la medición se efectúa en transmisión directa, los orificios se sitúan en el centro de caras opuestas. Se han realizado orificios en los 4 cantos de la probeta para medir la velocidad de propagación en paralelo y perpendicular a los planos de encolado.



(a)



(b)

Figura 47. a) Equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio compuesto por centralita, dos cables de transmisión de señal y dos transductores cónicos. b) Resultados obtenidos en pantalla por el equipo durante la realización de un ensayo. (Fuente propia)

Es necesario introducir en el equipo la distancia del elemento a medir, para que este pueda con posterioridad calcular la velocidad de transmisión de la onda, **Figura 48 b).**



Figura 48. Ejecución de perforaciones para acople de transductores de US. (Fuente propia)

El valor de velocidad ofrecido por el equipo es el resultado del promedio de 12 medidas. A su vez, para eliminar incertidumbres se ejecutaron un total de 12 repeticiones en cada una de las direcciones ensayadas, de forma que el resultado de cada ensayo está asociado a 144 lecturas.

3.3.1.6 Método resistográfico

Resistógrafo marca IML, modelo PD-500.

El equipo empleado **Figura 49** tiene una longitud de broca de 500 mm, un diámetro de fuste 1,5 mm y una punta cónica de perforación de 3 mm de diámetro.



Figura 49. Resistógrafo marca IML, modelo PD-500. (Fuente propia)

Previo a la ejecución de la campaña experimental, fue necesario realizar pruebas para la obtención de los parámetros de velocidad de avance y velocidad de giro de la broca, de tal forma que se obtengan valores medios de la amplitud resistográfica lo más cercanos al 40% (valor especificado por el fabricante del equipo para la obtención de una resolución óptima). **Tabla 4.**

Las **Figura 50 y Figura 51** incluyen una comparativa de las amplitudes obtenidas para dos configuraciones distintas. Estas variables dependen casi únicamente de la especie de madera, ya que, si tuviésemos una especie de madera con elevada densidad, se deberían adoptar



velocidades de avance menores y velocidades de giro mayores, para obtener valores de media de amplitud resistográfica cercanos al 40%.

Tabla 4. Pruebas de amplitud con diferentes configuraciones para madera de pino.

Drilling Speed (rpm)	Feed Speed (cm/min)	Rango Valores Amplitud (%)
1500	50	10 – 45
1500	75	10 – 45
1500	100	10 – 60
1500	120	20 – 60
2000	100	20 – 45
2000	120	20 – 55 (Baja resolución)
2000	140	20 – 60
2500	100	Valores bajos
3500	100	Valores bajos
5000	100	Valores bajos

Tras las pruebas realizadas para las maderas de pino y abeto, se establecieron como valores para la velocidad de avance y de giro 100 cm/min y 1500 rpm, respectivamente. Aunque hay más configuraciones que dan rangos de valores alrededor del 40%, se ha preferido la que tiene una menor velocidad de avance, en vistas a que sea más resiliente cuando se encuentre con zonas de elevada dureza, como nudos.

También, se fijó una parada de seguridad en la perforación para cavidades de 2 cm, para evitar posibles daños a la broca al pasar de un medio vacío, como una cavidad, hacia la madera. Esto sirve también como criterio de parada automática de la perforación cuando la broca sale por el otro extremo de la rebanada.

La ejecución de las perforaciones resistográficas se realizó fijando las rebanadas sobre una superficie horizontal con ayuda de dos sargentos y colocando el resistógrafo perpendicular a la superficie durante todo el taladrado **Figura 52 a)**. La horizontalidad de la broca es fácil de controlar gracias al giróscopo integrado del equipo, que aparece en la pantalla del equipo. Adicionalmente, cada resistografía se identificó con un comentario en el equipo. Este comentario incluía información sobre la probeta y el número de perforación en la misma, como se muestra en la **Figura 52 b)**.

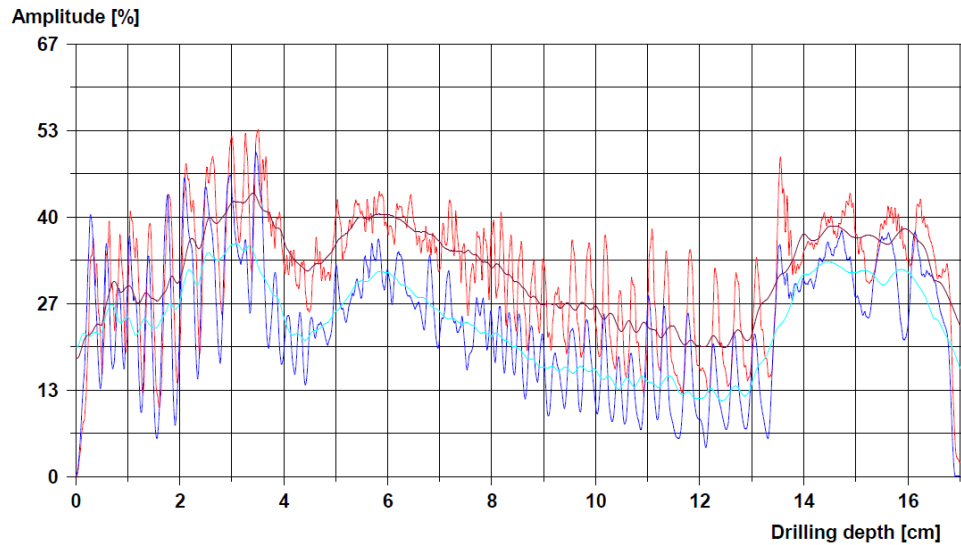


Figura 50. Amplitud resistográfica óptima con parámetros feed speed 100 cm/min y drill speed 1500 rpm.

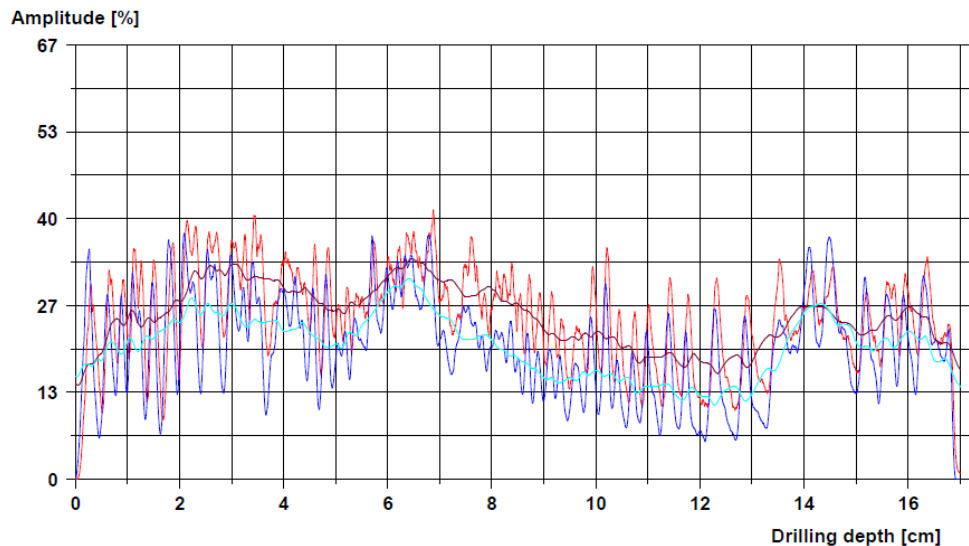


Figura 51. Amplitud resistográfica baja con parámetros feed speed 80 cm/min y drill speed 1500 rpm.



(a)



(b)

Figura 52. a) Fijación de la probeta a ensayar. b) Menú principal resistógrafo. (Fuente propia)

Durante la perforación, la pantalla del equipo muestra el avance del gráfico resistográfico (**Figura 53**), que posteriormente también puede visualizarse con el software PD-Tools Pro de IML.

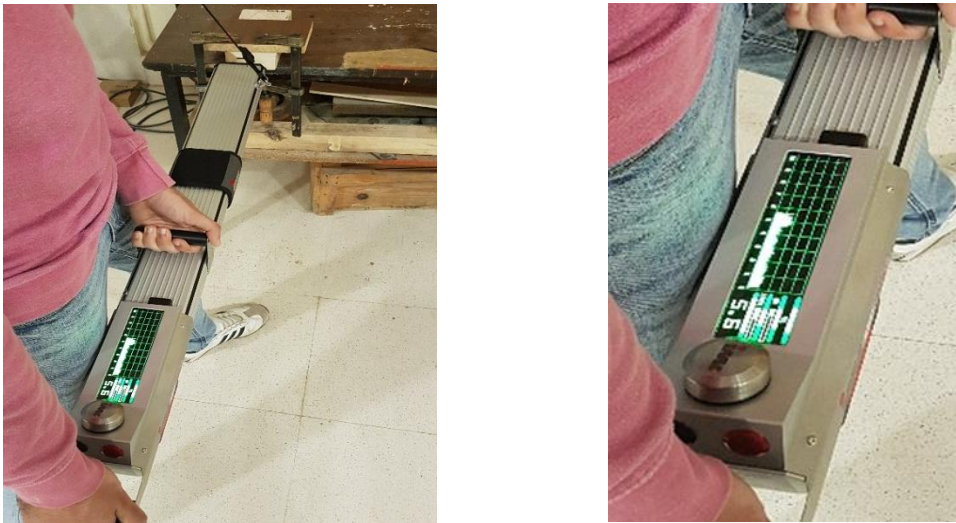


Figura 53. Ejecución de ensayo. Visualización gráfica en el equipo. (Fuente propia)

Un ejemplo de la visualización que proporciona el software se muestra en la **Figura 54**. En ella se pueden observar las gráficas “drill curve” en rojo y “feed curve” en azul, cada una con el trazado de los valores medios de la amplitud resistográfica. Estos valores de la media para cada punto son los correspondientes al promedio de los valores de amplitud para el rango de puntos 0,5 cm hacia adelante y 0,5 cm hacia atrás. También, se incluye un cuadro con las variables fijadas del ensayo y un cuadro de comentarios.

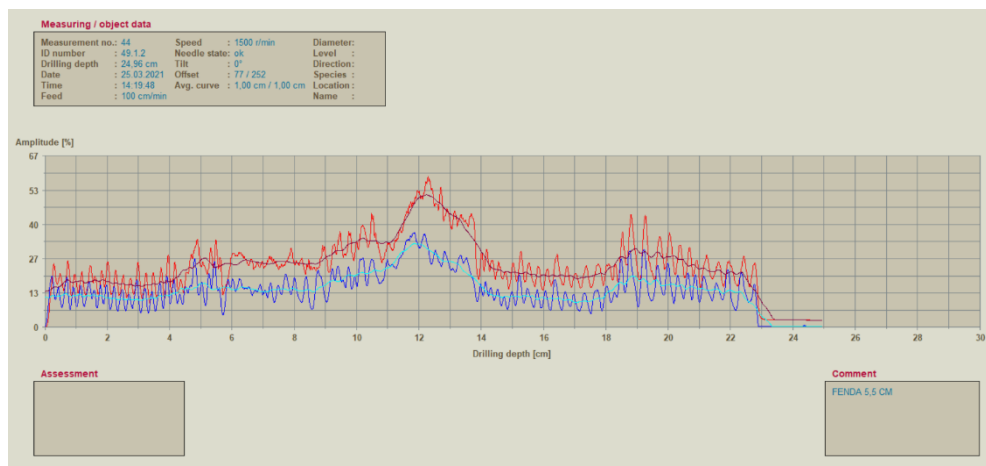


Figura 54. Software IML PD-Tools Pro. Visualización de gráfica resistográfica, comentarios y parámetros de ensayo. (Fuente propia)

3.3.2 Tratamiento de datos por ensayos

En este apartado se describe la metodología seguida para la obtención de los datos cuantitativos de los ensayos realizados en las probetas de madera laminada. En el ANEXO 1 se encuentran recogidas la totalidad de fichas técnicas de las probetas. La obtención de los datos que las conforman se explica en detalle en los siguientes apartados.



3.3.2.1 Volumen

Con la ayuda del calibre digital se han tomado medidas de las 3 dimensiones con precisión de 0,01 mm. Posteriormente se ha calculado en Excel el volumen de cada probeta.

Aquellas probetas que poseían algún tipo de defecto o irregularidad, la medición de la superficie se ha realizado escaneando la pieza e importándola en AutoCAD, como se refirió en el apartado

4.3.1.3. Medición de las dimensiones de las probetas

3.3.2.2 Peso

La gravimetría se ha ejecutado en diferentes momentos de la campaña de ensayos:

- **Previo al inicio de la campaña de ensayos:** con una balanza con una precisión de 0,1 g, se han hecho las pesadas durante el acondicionamiento.
- **Posterior a la realización de ensayos:** Se han registrado antes y después del secado los valores de peso con una balanza de precisión con sensibilidad de 0,01 g.

3.3.2.3 Densidad

La densidad de la probeta se ha obtenido con los datos de peso y volumen obtenidos en los apartados anteriores, normalizados al 12% de humedad.

La norma UNE 384 [44] establece la manera de corregir la densidad de una probeta cuya humedad difiera del 12% de acuerdo a la **Ecuación 6**, donde ρ es la densidad corregida, $\rho(u)$ es la densidad real de la probeta, u es la humedad real de la probeta y u_{ref} es la humedad a la que se quiere corregir la densidad, en este caso 12%.

$$\rho = \rho(u) (1 - 0,005 (u - u_{ref}))$$

Ecuación 6. Corrección de la densidad según la humedad interna.

3.3.2.4 Humedad (xilohigrómetro y estufa)

Los valores de humedad obtenidos mediante xilohigrómetro se han proporcionado con una aproximación del 0,1% que coincide con la que marca el equipo.

En el caso de la estufa, la humedad se ha calculado por la diferencia de pesadas antes y después del secado de acuerdo con la **Ecuación 2**. El resultado se ha expresado con una aproximación del 0,1%.

Los datos de las dimensiones, volumen, pesos y humedad se han registrado en un archivo Excel separando por grupos de probetas de la muestra como se ve en las **Tabla 5 y Tabla 6**.



Tabla 5. Dimensiones, volumen, pesos y humedad de las probetas.

Viga	Probeta	Dimensiones			Volumen cm ³	Pesos		Humedad	
		Largo	Ancho mm	Alto		P _{Acond}	P _{Estufa}	H _{Xilohigr}	H _{Estufa}
26	1	172,08	98,81	29,79	506,53	229,7	201,77	14,4	13,8
	2	171,92	99,05	31,88	542,87	253,1	222,59	16,3	13,7
	3	171,99	98,96	31,59	537,67	250,0	217,83	16,0	14,8
	4	171,96	99,05	23,6	401,97	190,3	166,10	17,0	14,6
	5	171,74	98,79	29,46	499,82	250,3	218,79	17,5	14,4
38	1	167,68	139,45	33,53	784,03	389,5	343,82	18,2	13,3
	2	167,67	139,09	30,22	704,77	401,7	354,67	18,2	13,3
	3	167,18	139,49	31,23	728,28	368,9	325,65	17,2	13,3
	4	167,39	139,66	34,12	797,65	398,1	351,07	17,2	13,4
	5	167,38	139,65	34,44	805,02	434,0	382,97	16,1	13,3
41	1	226,05	100,22	28,38	642,94	297,3	263,47	16,1	12,8
	2	226,45	99,74	28,25	638,06	307,5	271,58	16,0	13,2
	3	226,42	100,43	30,97	704,24	328,0	291,30	15,9	12,6
	4	226,85	99,82	29,67	671,85	289,9	255,57	15,7	13,4
	5	226,3	99,73	29,7	670,30	303,2	269,69	15,9	12,4

Tabla 6. Densidad, diferencia de densidad y diferencia de humedad (Acond-Anhidro).

Viga	Probeta	Densidad Acond.	Densidad Anhidro	Densidad Corregida H = 12%	Variación	
		g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	Diferencia D %	Diferencia H %
26	1	0,453	0,398	0,449	-0,92	4,03
	2	0,466	0,410	0,462	-0,85	18,92
	3	0,465	0,405	0,459	-1,38	8,34
	4	0,473	0,413	0,467	-1,28	16,68
	5	0,501	0,438	0,495	-1,20	21,51
38	1	0,497	0,439	0,494	-0,64	36,99
	2	0,570	0,503	0,566	-0,63	37,25
	3	0,507	0,447	0,503	-0,64	29,51
	4	0,499	0,440	0,496	-0,70	28,39
	5	0,539	0,476	0,536	-0,66	20,83
41	1	0,462	0,410	0,460	-0,42	25,39
	2	0,482	0,426	0,479	-0,61	20,97
	3	0,466	0,414	0,464	-0,30	26,20
	4	0,431	0,380	0,428	-0,72	16,88
	5	0,452	0,402	0,451	-0,21	27,96

3.3.2.5 Velocidad de propagación de ultrasonidos

Como se ha comentado anteriormente, se ha medido la velocidad ultrasónica en dirección perpendicular y paralela a los planos de encolado de las probetas de madera laminada.

El tratamiento de los datos se ha realizado mediante el cálculo del promedio y de la desviación típica de los 12 valores de velocidad (12 medidas/repetición) de cada probeta y en dos direcciones de medición. Para eliminar valores extremos se ha adoptado el criterio de excluir los valores que no entran en el rango de la **Ecuación 7**, donde \bar{X} es el valor medio de la amplitud resistográfica y SD es la desviación típica.

$$\bar{X} - SD < x < \bar{X} + SD$$

Ecuación 7. Rango límite de valores extremos.

Este proceso ha sido iterativo hasta que los valores medios de la velocidad de propagación no han presentado diferencias significativas o hasta que la desviación típica ha sido nula (**Tabla 7**).

Tabla 7. Exclusión de datos extremos de velocidades ultrasónicas. Iteraciones cálculo de media y desviación típica.

Iteración 1														Promedio	Desv Tip	
Viga	Probeta	Medición														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
26	1	2091	2091	2091	2091	2091	2091	2091	2091	2091	2091	2091	2091	2091	2091,0	0,0
	2	2165	2165	2165	2165	2165	2165	2165	2165	2203	2203	2203	2165	2174,5	16,5	
	3	1927	1927	1927	1927	1927	1927	1927	1927	1927	1927	1927	1927	1927,0	0,0	
	4	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203,0	0,0	
	5	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203	2203,0	0,0	
Iteración 2														Promedio	Desv Tip	
Viga	Probeta	Medición														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
26	1															
	2	2165	2165	2165	2165	2165	2165	2165	2165				2165	2165,0	0,0	
	3															
	4															
	5															

Cabe mencionar que los valores de velocidad ultrasónica dependen de la humedad, a medida que la humedad interna sube, en las mismas condiciones, la velocidad ultrasónica desciende. Por tanto, al igual que se ha hecho con la densidad, se han corregido estos valores para una humedad normalizada del 12%, empleando la **Ecuación 8**, donde $V_{12\%}$ es la velocidad corregida al 12% de humedad, H_t es la humedad de la muestra ensayada y V_t es la velocidad de propagación obtenida en el ensayo.

$$V_{12\%} = \left(1 - ((H_t - 12) \times 0,008)\right) \times V_t$$

Ecuación 8. Corrección para la velocidad de ultrasonidos.

3.3.2.6 Perforaciones resistográficas

- **Profundidad de perforación**

Para este ensayo, el primer dato a obtener ha sido la profundidad de perforación. Este dato puede ser diferente a la longitud de la rebanada y esto se debe a que, debido a la heterogeneidad de la dureza del material y la existencia de imperfecciones, la broca tiende a desviarse, curvándose, pudiendo salir por cualquiera de las superficies de la probeta.

Este parámetro se ha obtenido con la ayuda del software de visualización de las resistografías de IML, llamado PD-Tools Pro.

En la **Figura 55** puede observarse la determinación del punto de salida de la broca con la línea discontinua roja y una ventana flotante con el dato de profundidad.

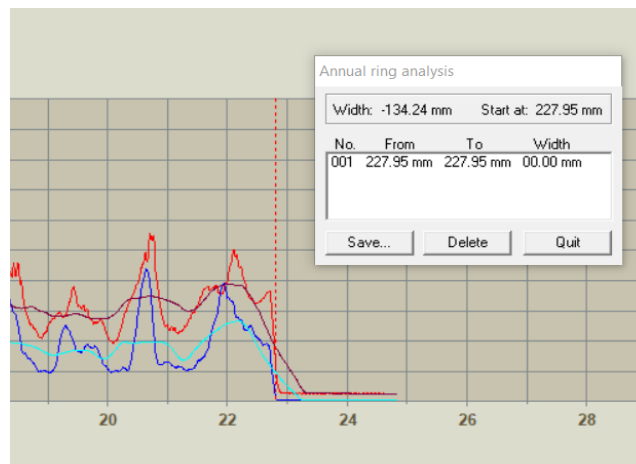


Figura 55. Determinación de la longitud de perforación. (Fuente propia)

- **Confrontación perforación-perfil resistográfico**

Tras la obtención de la longitud se ha procedido al montaje, con ayuda de AutoCAD, de las figuras para la mejor interpretación de las gráficas resistográficas sobre la misma probeta donde se realizaron.

Se emplearon los mismos escaneos del apartado 3.3.2.2 *Volumen*, puesto que ya se encontraban realizados para todas las rebanadas. Se vincularon en formato PDF en AutoCAD. Tras esto, cada una de las gráficas resistográficas se orientó de izquierda a derecha o al revés, para de la misma forma incluirlas en el mismo archivo de AutoCAD.

Observando los puntos de entrada y salida de la perforación en las probetas, se trazó una trayectoria rectilínea. Esta trayectoria es una aproximación, ya que en el punto de inicio la broca incide en dirección perpendicular, pero por dentro de la probeta debido a la esbeltez de esta y la diferencia de dureza del material que atraviesa durante la perforación, se puede producir una desviación. Por ello, los puntos de la probeta a los que se asignan los valores de amplitud resistográfica tienen un cierto grado de incertidumbre.

Una vez trazada la trayectoria, se ejecuta el alineado y escalado de las gráficas, así como unas líneas de guía para separar la resistografía en 5 áreas, correspondientes con cada una de las

tablas encoladas que conforman la probeta. Los elementos diferenciadores han sido los planos de encolado.

A modo de ejemplo, la **Figura 56** muestra el resultado sobre una de las probetas.

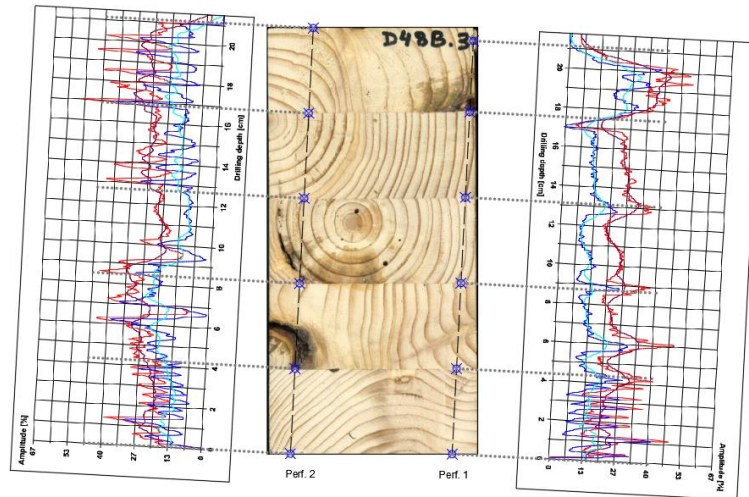


Figura 56. Ejemplo de montaje de gráficas sobre probeta.

- **Cálculo de las variables resistográficas**

Las lecturas obtenidas por el resistógrafo se han exportado en formato *.TXT, para facilitar la gestión de estas con el programa Excel.

La cadencia de datos registrados por el resistógrafo es muy elevada, tomando un dato de resistencia al giro ("drill resistance") y otro de la resistencia al avance ("feed resistance") cada 0,1 mm, lo que permite una excelente resolución e identificación de las irregularidades, anillos de crecimiento y anomalías en la madera. Una probeta de unos 20 cm tiene un total de 2000 datos, que se filtran eliminando el primer milímetro de perforación hasta que la broca penetra en la madera y del mismo modo, la parte final, a partir de donde la broca llega al orificio de salida.

Los parámetros relevantes, que se han calculado de los datos filtrados de las perforaciones, son la media de amplitud resistográfica y la desviación típica de los datos.

Para la obtención de una media realista de la madera de las probetas, se han excluido los valores extremos bajos de cavidades, acebolladuras, fendas, etc., y también, los valores elevados pertenecientes a las interfases encoladas y zonas con la existencia de nudos. Esto se ha conseguido haciendo repetidas iteraciones, en las que se han excluido los datos que han quedado fuera del rango de la **Ecuación 9**, donde \bar{X} es el valor medio de la amplitud resistográfica y SD es la desviación típica.

$$\bar{X} - SD < x < \bar{X} + SD$$

Ecuación 9. Rango límite de valores extremos.



El proceso se ha repetido hasta que la media resistográfica converge a un valor, no variando entre dos iteraciones más del 0,5% en valores absolutos de amplitud resistográfica, hecho que se comprueba en la **Tabla 9**.

En la **Tabla 8** se ve un ejemplo de filtrado de los datos extremos, en la **Tabla 10** la cantidad de lecturas que restan tras cada iteración. Y, por último, los datos medios de *drill resistance* y *feed resistance* característicos de dichas probetas y sus correspondientes desviaciones típicas (**Tabla 11 y Tabla 12**).

Tabla 8. Exclusión de datos extremos por iteraciones sucesivas.

		0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34
49.1.1	Drill 1	2,97	4,77	6,67	8,87	11,5	13,57	14,92	16,44	17,3	17,35	17,21	16,85	16,04	14,9	13,67	12,86	12,64	12,44	12,3	12,12	11,78	11,33	10,98	10,96	11,16
	Feed 1	7,41	8,63	9,65	10,2	10,6	10,87	10,99	10,92	10,76	10,61	10,48	10,44	10,43	10,74	11,29	12,18	12,96	13,64	14,04	14,38	14,47	14,54	14,62	15,02	15,71
	Drill 2		8,63	9,65	10,2	10,6	10,87	10,99	10,92	10,76	10,61	10,48	10,44	10,43	10,74	11,29	12,18	12,96	13,64	14,04	14,38	14,47	14,54	14,62	15,02	15,71
	Feed 2																									
	Drill 3																									
	Feed 3						10,87	10,99	10,92	10,76					10,74	11,29	12,18	12,96	13,64	14,04	14,38	14,47	14,54	14,62	15,02	15,71
	Drill 4																									
	Feed 4																12,18	12,96	13,64	14,04	14,38	14,47	14,54	14,62	15,02	15,71
	Drill 5																									
	Feed 5																									
	Drill 6																									
	Feed 6																									
	Drill 7																									
	Feed 7																									

Tabla 9. Variación de la media entre dos iteraciones sucesivas. Rojo > 0,5%; Verde < 0,5% (Valores absolutos).

Variación de la Media	Probeta						
	49.1.1	49.1.2	49.1.3	49.1.4	49.1.1	49.1.2	49.1.3
Drill 2-1	0,21	1,79	1,55	2,03	0,24	0,15	0,17
Feed 2-1	0,79	1,15	1,30	1,34	0,30	0,21	0,33
Drill 3-2	0,39	0,20	0,69	0,80	0,19	0,25	0,13
Feed 3-2	0,23	0,28	0,42	0,33	0,10	0,13	0,07
Drill 4-3	0,14	0,06	0,10	0,20	0,02	0,13	0,07
Feed 4-3	0,05	0,06	0,10	0,17	0,01	0,05	0,09
Drill 5-4	0,14	0,03	0,03	0,05	0,00	0,07	0,04
Feed 5-4	0,02	0,01	0,02	0,05	0,00	0,01	0,02
Drill 6-5	0,05	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,04
Feed 6-5	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01
Drill 7-6	0,04	0,02	0,02	0,06	0,02	0,03	0,02
Feed 7-6	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01

Tabla 10. Número de datos empleados en el cálculo de la media y desviación típica en cada iteración.

Cantidad de Datos	Probeta						
	49.1.1	49.1.2	49.1.3	49.1.4	49.1.1	49.1.2	49.1.3
Drill 1	1950	2280	957	987	2275	1948	2270
Feed 1	1950	1722	956	985	2275	1948	2270
Drill 2	1324	1186	827	822	1642	1279	1568
Feed 2	1442	1142	733	830	1603	1315	1557
Drill 3	799	744	493	563	981	770	927
Feed 3	870	724	445	526	973	814	949
Drill 4	442	449	304	352	595	484	530
Feed 4	519	452	267	295	563	477	566



Drill 5	253	264	178	216	354	283	304
Feed 5	313	278	153	176	330	277	328
Drill 6	154	158	106	121	197	170	170
Feed 6	180	152	88	101	171	164	193
Drill 7	90	89	58	69	108	98	99
Feed 7	102	82	57	61	98	92	110

Tabla 11. Valores de media para cada probeta en diferentes iteraciones (Coloreado = Variación < 0,5%).

Media		Probeta						
		49.1.1	49.1.2	49.1.3	49.1.4	49.1.1	49.1.2	49.1.3
Drill 1		22,99	25,74	21,35	21,43	23,17	21,52	22,59
	Feed 1	15,09	15,88	14,32	14,09	13,87	12,92	13,95
Drill 2		22,77	23,95	19,80	19,40	22,93	21,67	22,42
	Feed 2	14,30	14,73	13,02	12,76	13,56	12,71	13,63
Drill 3		23,17	23,75	19,11	18,61	23,11	21,92	22,55
	Feed 3	14,06	14,45	12,60	12,42	13,66	12,58	13,56
Drill 4		23,31	23,81	19,01	18,41	23,13	22,05	22,62
	Feed 4	14,11	14,39	12,50	12,26	13,67	12,53	13,47
Drill 5		23,45	23,84	18,98	18,35	23,13	22,12	22,66
	Feed 5	14,13	14,40	12,52	12,21	13,68	12,51	13,45
Drill 6		23,50	23,82	18,99	18,37	23,12	22,15	22,70
	Feed 6	14,16	14,38	12,51	12,22	13,66	12,55	13,44
Drill 7		23,55	23,84	18,96	18,31	23,11	22,17	22,72
	Feed 7	14,15	14,36	12,52	12,23	13,66	12,55	13,43

Tabla 12. Valores desviación típica para cada probeta en diferentes iteraciones (Coloreado = Variación < 0,5%).



Desviación Típica	Probeta							
	49.1.1	49.1.2	49.1.3	49.1.4	49.1.1	49.1.2	49.1.3	
Drill 1	8,61	9,42	9,96	9,22	6,08	5,87	5,76	
Feed 1	7,10	6,50	7,75	7,75	4,91	5,46	5,30	
Drill 2	4,69	4,52	5,09	4,38	3,30	3,14	3,25	
Feed 2	3,68	3,28	4,15	3,96	2,60	2,81	2,77	
Drill 3	2,69	2,36	2,69	2,30	1,84	1,64	1,94	
Feed 3	2,02	1,75	2,32	2,27	1,50	1,57	1,51	
Drill 4	1,54	1,26	1,46	1,25	1,05	0,92	1,12	
Feed 4	1,13	1,01	1,32	1,22	0,88	0,89	0,84	
Drill 5	0,86	0,67	0,80	0,74	0,63	0,52	0,66	
Feed 5	0,64	0,60	0,72	0,69	0,54	0,50	0,48	
Drill 6	0,48	0,39	0,45	0,41	0,39	0,29	0,38	
Feed 6	0,38	0,35	0,40	0,41	0,31	0,29	0,28	
Drill 7	0,27	0,22	0,23	0,22	0,23	0,15	0,22	
Feed 7	0,22	0,20	0,23	0,26	0,19	0,16	0,16	

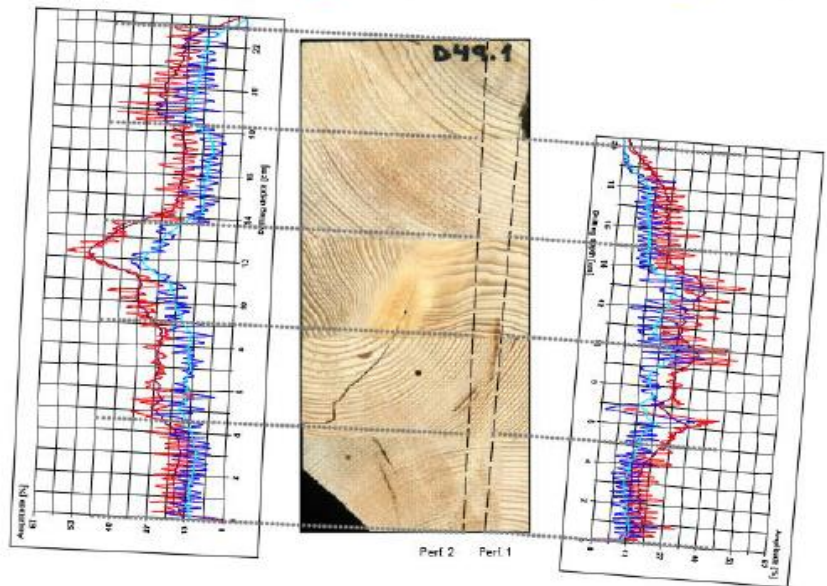
3.3.2.7 Fichas técnicas de las probetas

Todos los datos obtenidos y las figuras elaboradas se han incluido en una ficha técnica. Existe una por cada rebanada (**ANEXO 1**).

Esta ficha cuenta con el número identificador de la probeta, la especie de madera, la clase resistente asignada, las fechas en las que se realizó cada ensayo y una sección de comentarios en la que se incluye cualquier observación relevante sobre los ensayos ejecutados en dicha rebanada, explicando de forma cualitativa la naturaleza de las gráficas obtenidas.

Se adjuntan capturas del ejemplo de ficha técnica de una probeta en las **Figura 57** y **Figura 58**.

Especie		Nomencultura			
Abeto		D049 (1)			
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,490					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,16		99,46		30,74	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			14,8
24/03/2021		325			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					13,1
Fecha		Peso seco (g)			
26/03/2021		287,46			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1563	0,0	2420	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance



Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,99	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,95
	sd_{drill} (%)	8,61		sd_{drill} (%)	4,52
19,54	\bar{X}_{feed} (%)	14,30	22,86	\bar{X}_{feed} (%)	14,73
	sd_{feed} (%)	3,68		sd_{feed} (%)	3,28

Figura 57. Ejemplo de ficha técnica de probeta de ensayo. Página 1.

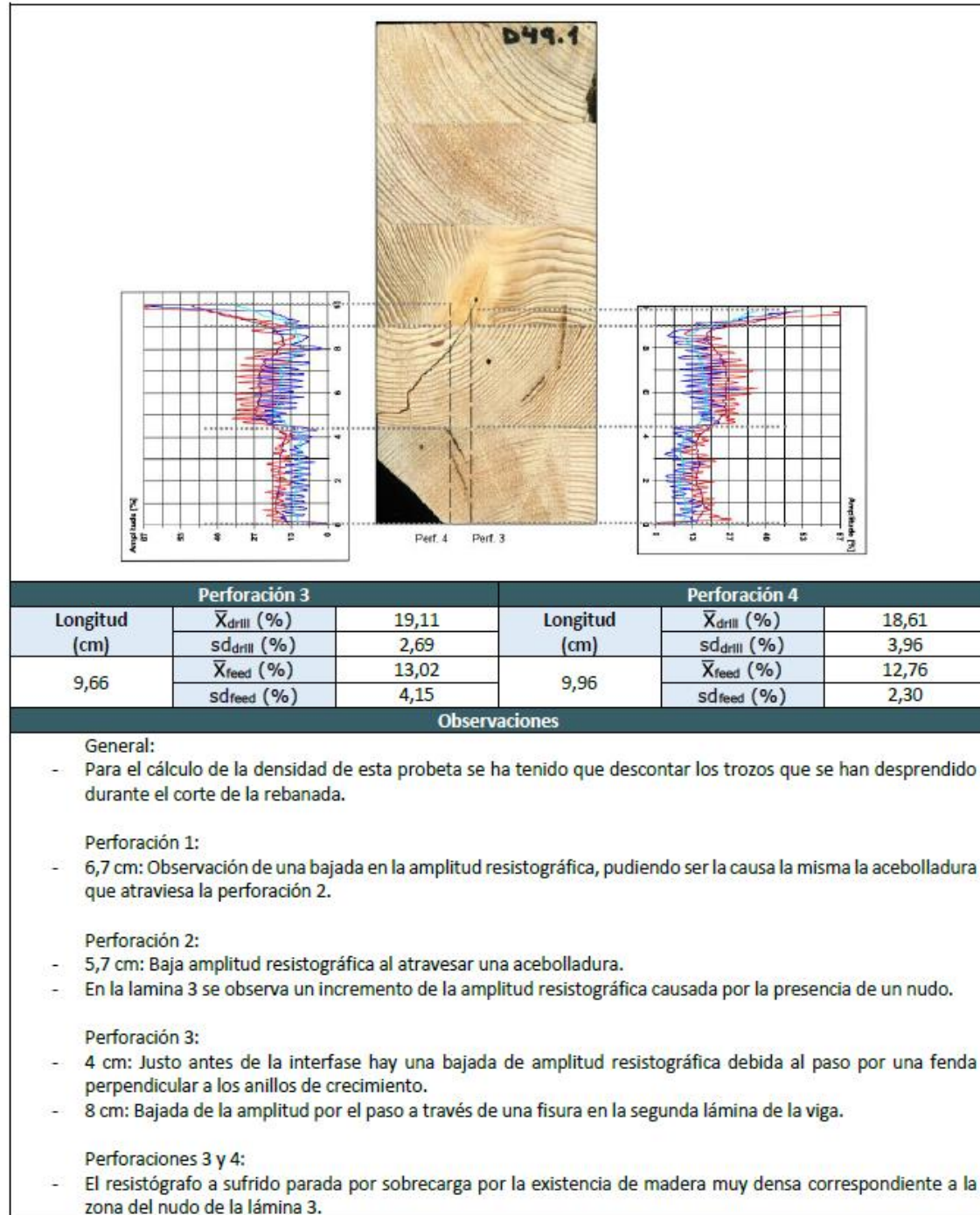


Figura 58. Ejemplo de ficha técnica de probeta de ensayo. Página 2.



Capítulo 4

Resultados y discusión de datos - Campaña de ensayos en laboratorio

4.1 Humedad xilohigrómetro Vs.

Humedad estufa

4.2 Densidad Vs. Clase resistente

4.3 Resistografía Vs. Densidad

**4.4 Velocidad de propagación de
ultrasonidos Vs. Densidad**

**4.5 Resistografía Vs. Velocidad de
propagación de ultrasonidos**

4.6 Resistografía Vs. Humedad estufa

**4.7 Velocidad de propagación de
ultrasonidos Vs. Humedad estufa**

4 Resultados y discusión de datos - Campaña de ensayos en laboratorio

4.1 Humedad xilohigrómetro Vs. Humedad estufa

De la muestra de 49 rebanadas se ha desestimado una debido al valor de humedad en estufa inusualmente alto que arrojó (16,6%), cuando el resto de las rebanadas de la misma viga han alcanzado valores próximos al 12,5%. Además, esa misma rebanada ha sido la única que ha registrado una lectura con el xilohigrómetro por debajo de la humedad real obtenida con el método de la estufa.

Se ha comprobado la precisión de medida ofrecida por el xilohigrómetro, mediante las probetas acondicionadas en la cámara climática, comparando su lectura con la de la humedad real obtenida mediante el método de la estufa según norma. En la **Figura 59** se representan los puntos correspondientes a las 48 probetas, así como la recta que representa los puntos de ajuste ideal del xilohigrómetro con la humedad en estufa. Se aprecia que en todos los casos el xilohigrómetro ofrece lecturas de humedad superiores a los de secado en estufa.

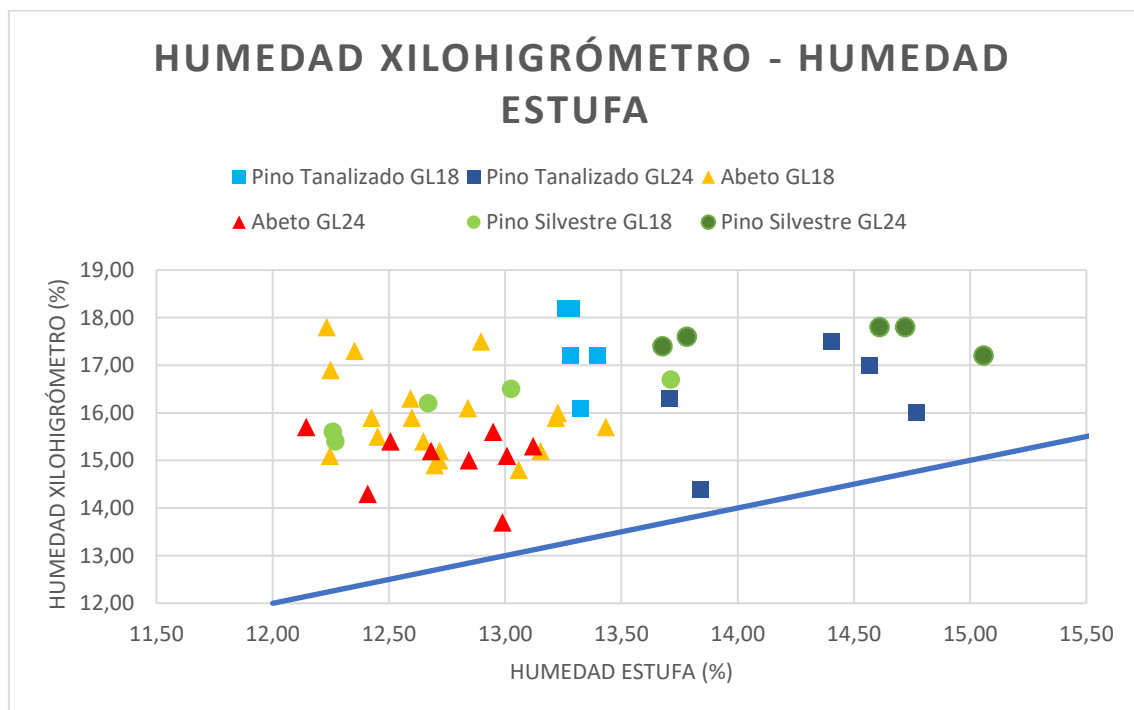


Figura 59. Gráfica precisión humedad xilohigrómetro.

Por su parte, en la **Figura 60** se compara el error del xilohigrómetro en relación a la humedad por secado en estufa, respecto a la humedad obtenida con el mismo equipo. Se observa que el primero aumenta cuanto mayor humedad registra.

Cabe mencionar, que esta definición del error no es del todo exacta dado que las medidas no son directamente comparables, ya que la humedad obtenida por estufa tiene un carácter global, (movilizando toda la rebanada), mientras que la del xilohigrómetro es local (únicamente considera la humedad en la tabla central). En base a este hecho, el xilohigrómetro podría ser más preciso de lo expresado, puesto que, a pesar de que sus lecturas difieren de la humedad real de la rebanada, la humedad de la lámina central podría ser más similar al dato obtenido.

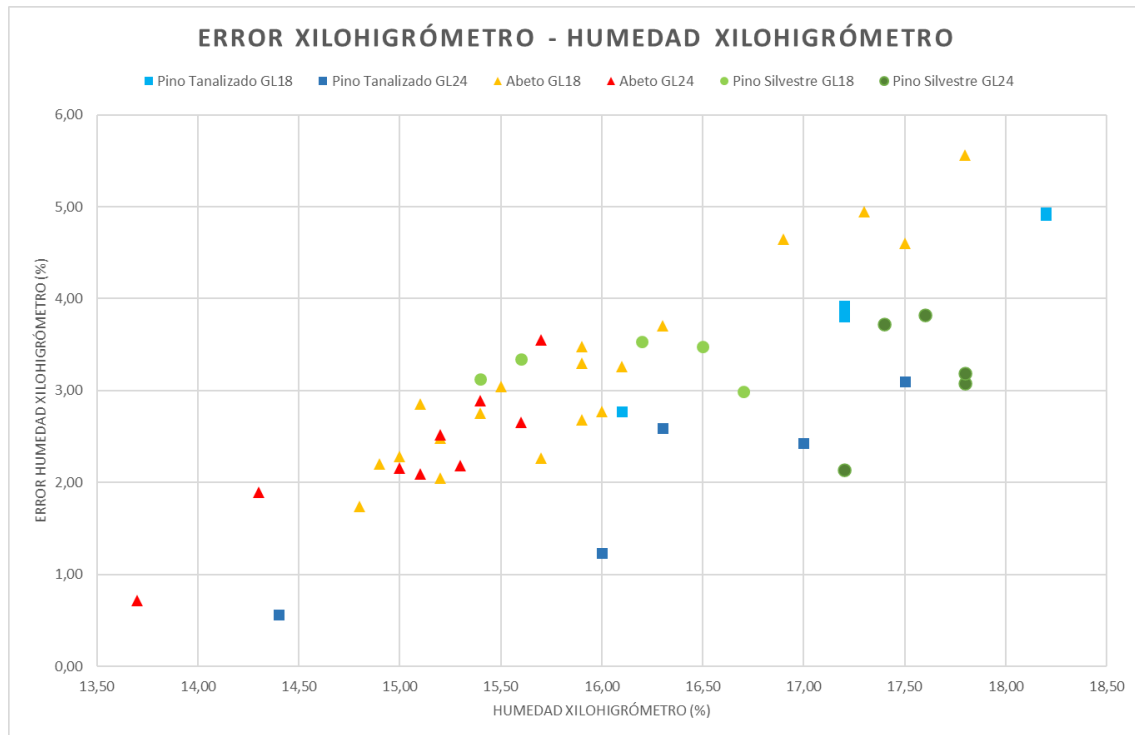


Figura 60. Error xilohigrómetro (en relación a la humedad por secado en estufa) - humedad xilohigrométrica.

En la **Figura 61** se aprecia que parece no haber una clara relación entre la humedad obtenida por secado en estufa de las probetas respecto al exceso de medición constatado por el xilohigrómetro.

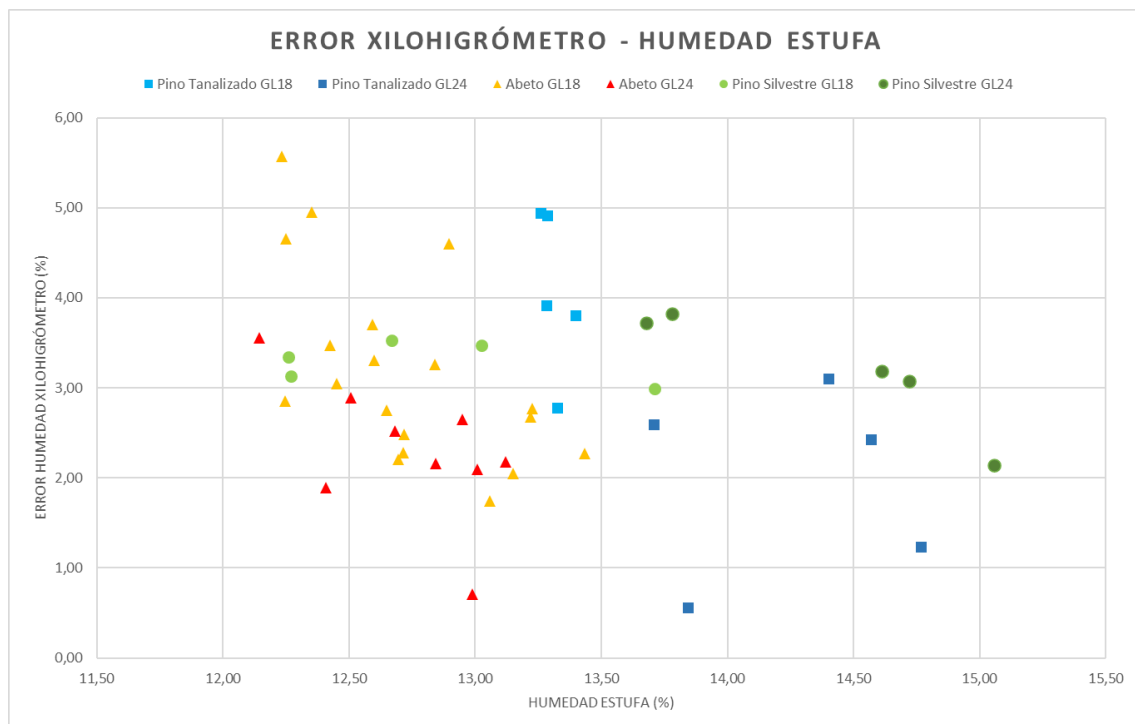


Figura 61 Error xilohigrómetro (en relación a la humedad por secado en estufa) - humedad secado en estufa.

4.2 Densidad Vs. Clase resistente

La densidad es una propiedad de la madera cuya correlación con las características mecánicas está demostrada. [27] El código técnico de la edificación CTE DB SE-M [4] indica a la hora de clasificar un elemento de madera laminada encolada que, por ejemplo, para una categoría GL18 homogénea, todas las láminas deben ser al menos C18. Lo que nos lleva a la norma UNE-EN 338 [26] (**Figura 62**) donde se tipifican las características físicas y mecánicas mínimas que una madera aserrada debe cumplir para clasificarse dentro de una clase resistente. Entre otras, dichas características son resistencias características mínimas, densidad media o densidad característica (con valores característicos referidos al percentil 5% del elemento).

	Clase	C14	C16	C18	C20	C22	C24
Propiedades de resistencia en N/mm²							
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24
Tracción paralela a la fibra	$f_{t,0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5
Tracción perpendicular a la fibra	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compresión paralela a la fibra	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21
Compresión perpendicular a la fibra	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5
Cortante	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
Propiedades de rigidez en kN/mm²							
Módulo de elasticidad medio en flexión paralela a la fibra	$E_{m,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0
Módulo de elasticidad característico en flexión paralela a la fibra (5% percentil)	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4
Módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37
Módulo de cortante medio	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69
Densidad en kg/m³							
Densidad característica (5% percentil)	ρ_k	290	310	320	330	340	350
Densidad media	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420

Figura 62. UNE-EN 338: 2017. Propiedades físicas y mecánicas según la clase resistente en madera aserrada.

Los datos de densidad obtenidos durante el ensayo arrojan dos conclusiones:

Como se observa en la **Tabla 13**, todas las vigas cumplen las especificaciones mínimas de densidad media especificadas por la norma UNE-EN 338 [26] para las clases resistentes GL18 y GL24.

Tabla 13. Comparación de la densidad media de cada viga con la densidad media mínima de la norma.

		Nº Viga	Clasificación	
			GL18	GL24
Densidad g/cm3	Densidad media UNE		0,380	0,420
	Pino Tanalizado	38	0,519	
		26		0,466
	Abeto	41	0,457	
		48	0,426	
		48 bis 2	0,508	
		49	0,471	
		54		0,439
		55		0,420
		Pino Silvestre	69	0,484
	75			0,544

Por otra parte, al estar relacionada la densidad con las capacidades (clases) resistentes, cabría esperar que aquellas vigas que correspondan a una clasificación GL24 tengan mayor densidad que las GL18, pero esto, en general, sólo se cumple en las probetas de pino silvestre sin tanalizar (vigas 69 y 75). En el resto de los casos, esto se justifica a la luz de la explicación realizada por la empresa Yofra sobre cómo fueron construidas las probetas GL18. Ya que, para ello, fue empleada madera C24 excedente de la fabricación de las vigas de clase resistente GL24, concretamente madera ubicada en los laterales de los troncos que, si bien suele ser madera más densa, no cumplía los requisitos de clasificación visual para una C24 por la presencia de nudos y otros defectos. Es decir, para la fabricación de las vigas GL18 se empleó madera C24 más densa que la empleada para las GL24.

4.3 Resistografía Vs. Densidad

Para el ajuste de los datos del ensayo resistográfico con la variable de la densidad de la probeta corregida al 12% de humedad, se optó, en una primera aproximación, por representar un par de valores por cada ensayo resistográfico realizado en cada probeta: uno para la media de la curva de perforación y otro para la media de la curva de avance, **Figura 63**. Se movilizaron un total de 113 valores que corresponden con otros tantos ensayos resistográficos realizados en las 49 probetas (es decir, en cada rebanada, en promedio, se realizaron 2,3 ensayos).

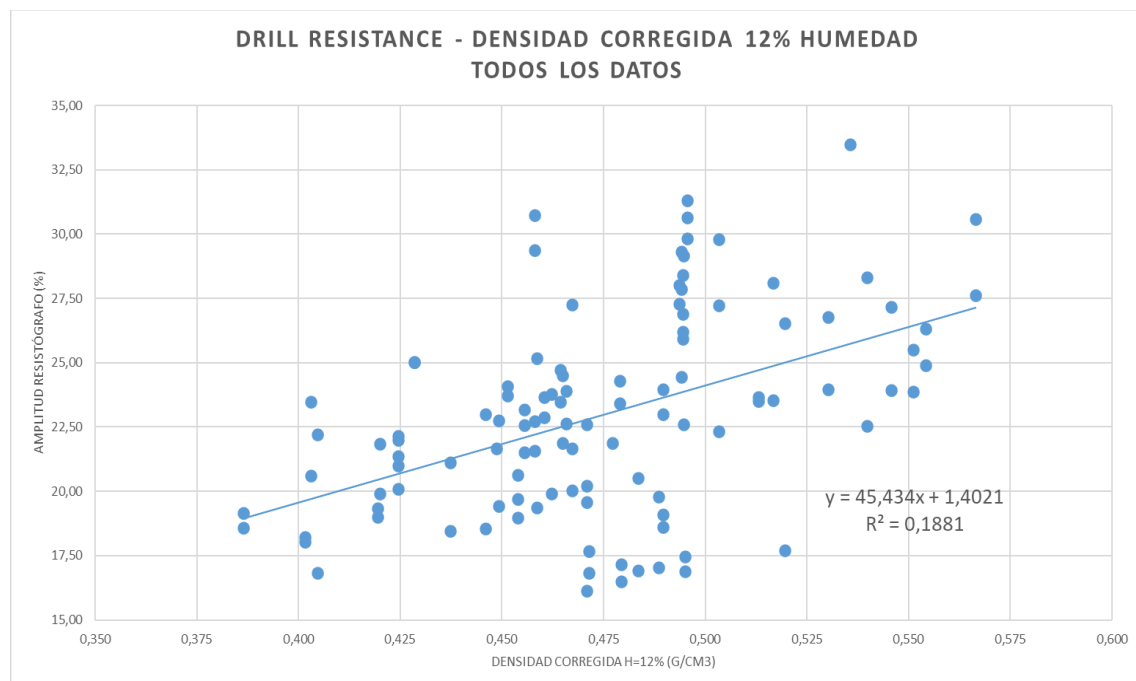


Figura 63. Drill Resistance – Densidad (constituido por los 113 valores de los ensayos resistográficos).

Seguidamente, en una segunda aproximación, se representaron un par de valores resistográficos por cada probeta, **Figura 64**. Dichos parámetros se obtienen del promedio de las medias de amplitud resistográfica de las perforaciones ejecutadas en una probeta. Así, en total, se han representado 49 datos para la gráfica *drill resistance* y otros tantos para la *feed resistance*.

El motivo de hacer un promedio para cada probeta es tratar de normalizar la muestra mediante la eliminación de datos extremales, debidos a singularidades, sobrecargas del resistógrafo, etc. De esta forma, se obtienen unos datos de amplitud que pueden ajustarse de forma más precisa

con una regresión lineal (se aprecia como el parámetro R^2 obtenido considerando los 113 ensayos es de 0,1881, mientras que tras realizar el promediado a nivel de probeta sube hasta 0,3009).

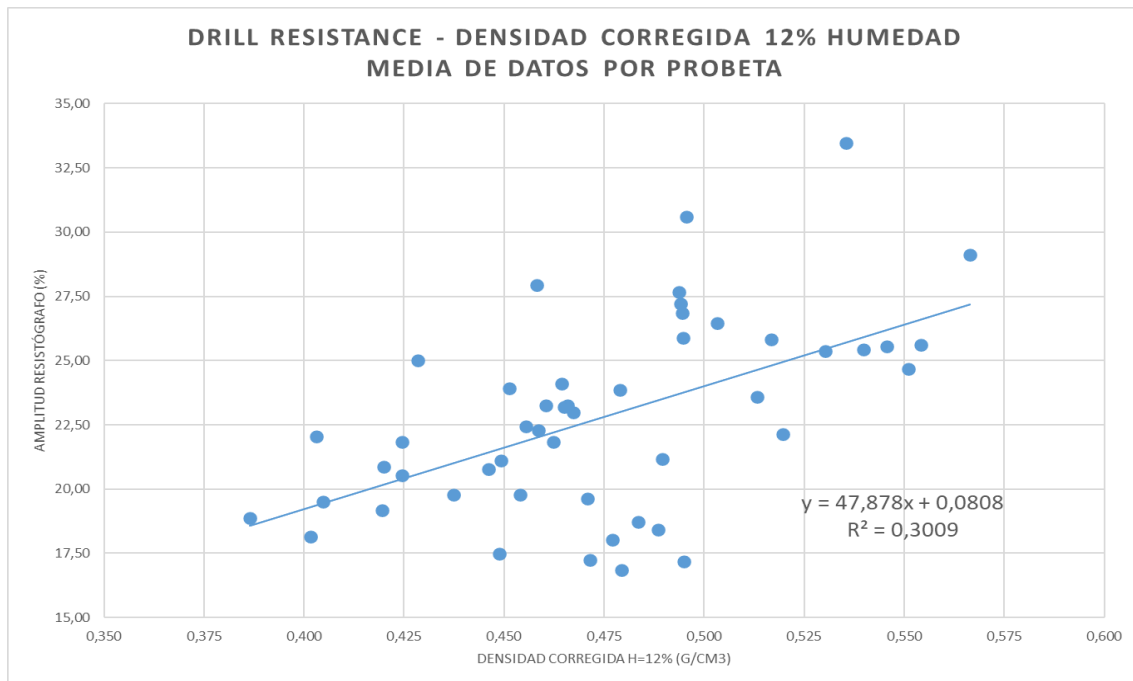


Figura 64. Drill Resistance – Densidad (constituido por las medias de los 49 valores resistográficos medios obtenidos para cada probeta).

Una vez establecida la metodología de tratamiento de los datos, se ha apreciado que, al tratarse de diferentes especies de madera y clases resistentes, los resultados están “separados” en diferentes regiones atendiendo a estas características. Por ello, es interesante, además de hacer una regresión lineal, representar los datos por grupos.

Los siguientes gráficos (**Figura 65 - Figura 72**) son la representación de *drill resistance* y *feed resistance* con la densidad corregida al 12% de humedad, para los valores promedios y las diferentes especies.

A la luz de los resultados, puede concluirse que, en general, en el caso del pino tanalzado y del pino silvestre la recta de regresión presenta un buen ajuste, no siendo este tan bueno en el caso del abeto (cabe mencionar que es la muestra con mayor número de elementos).

Por otro lado, puede comprobarse que la gráfica *feed resistance*–densidad aporta un ajuste de peor calidad que la del *drill resistance*–densidad, esto es porque, como se explicó en el apartado 3.2.4 *Resistografía.*, estos valores corresponden a la resistencia al avance, siendo una variable que está incluida, sobre todo para una ayuda cualitativa en la identificación de cavidades y no tanto para la relación cuantitativa de Las variables de perforación con otras de la madera.

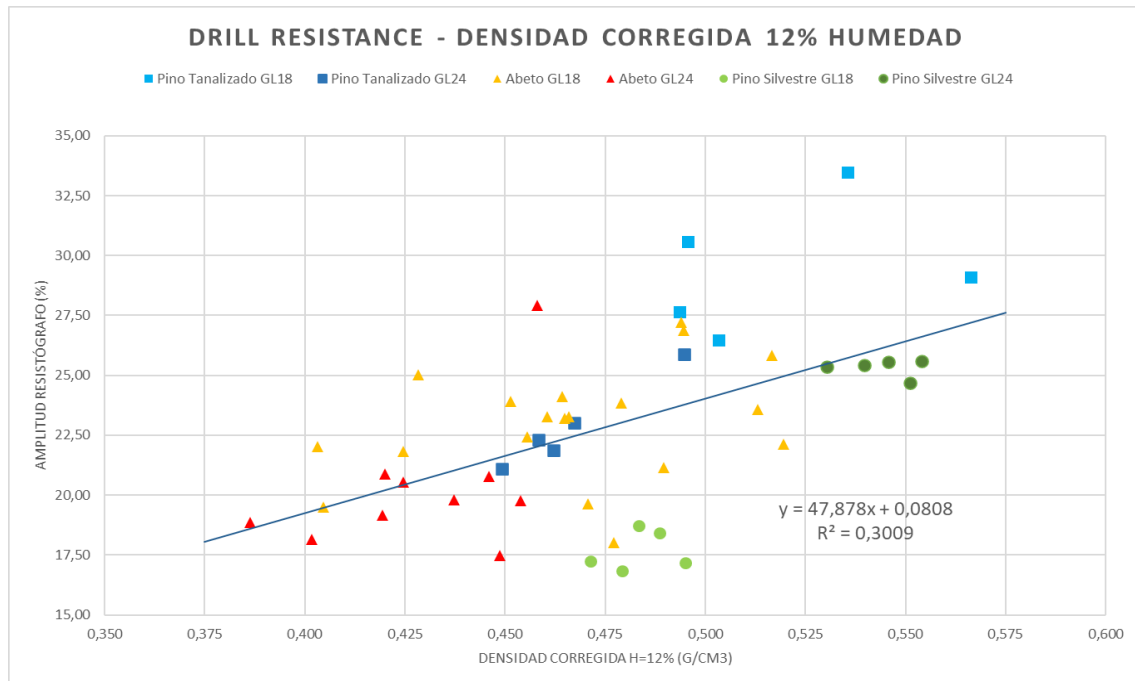


Figura 65. Drill resistance -. Densidad corregida al 12% humedad (valores promedios para cada probeta).

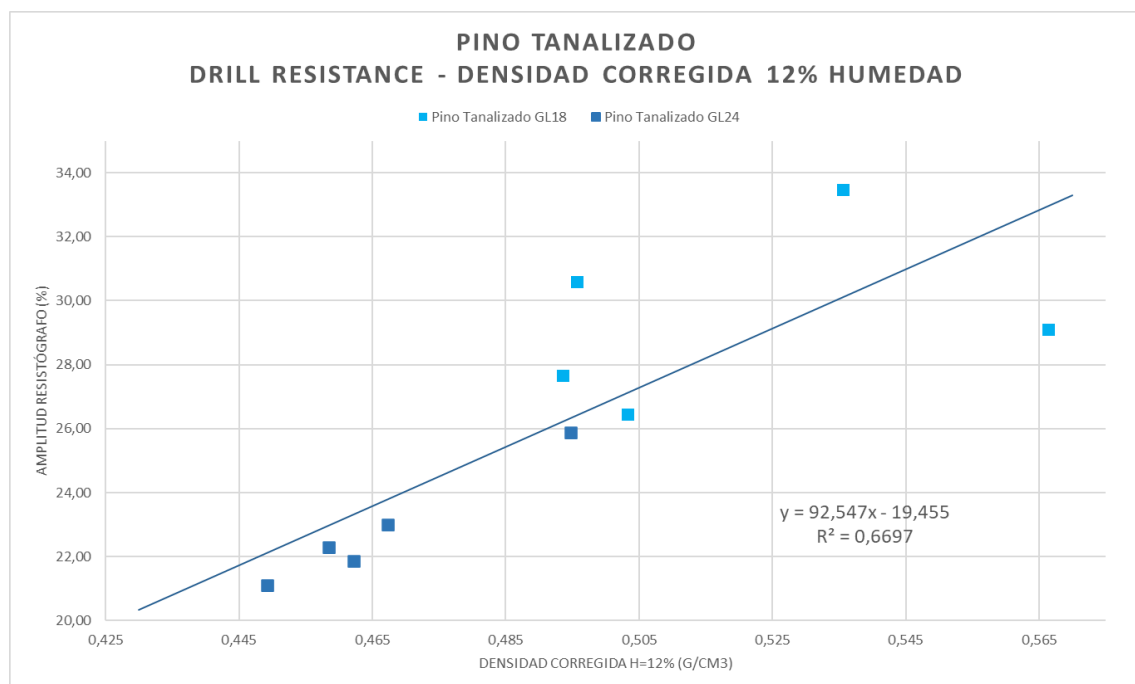


Figura 66. Pino Tanalizado: Drill resistance - Densidad corregida al 12% humedad. (valores promedios para cada probeta).

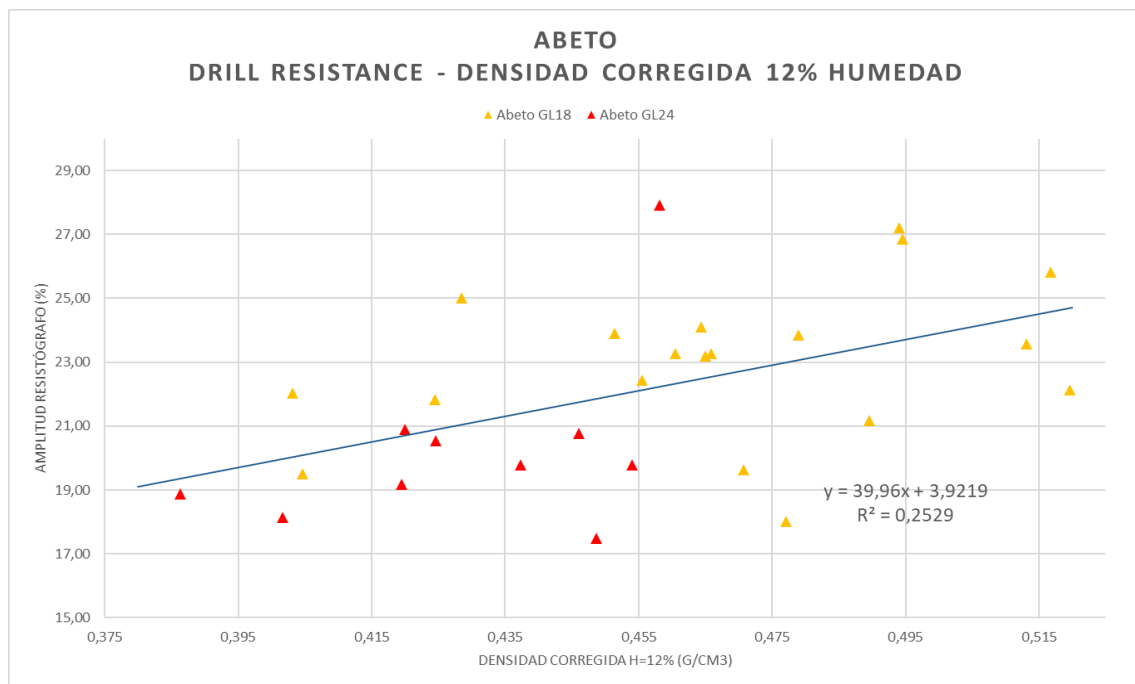


Figura 67. Abeto: Drill resistance - Densidad corregida al 12% humedad. (valores promedios para cada probeta).

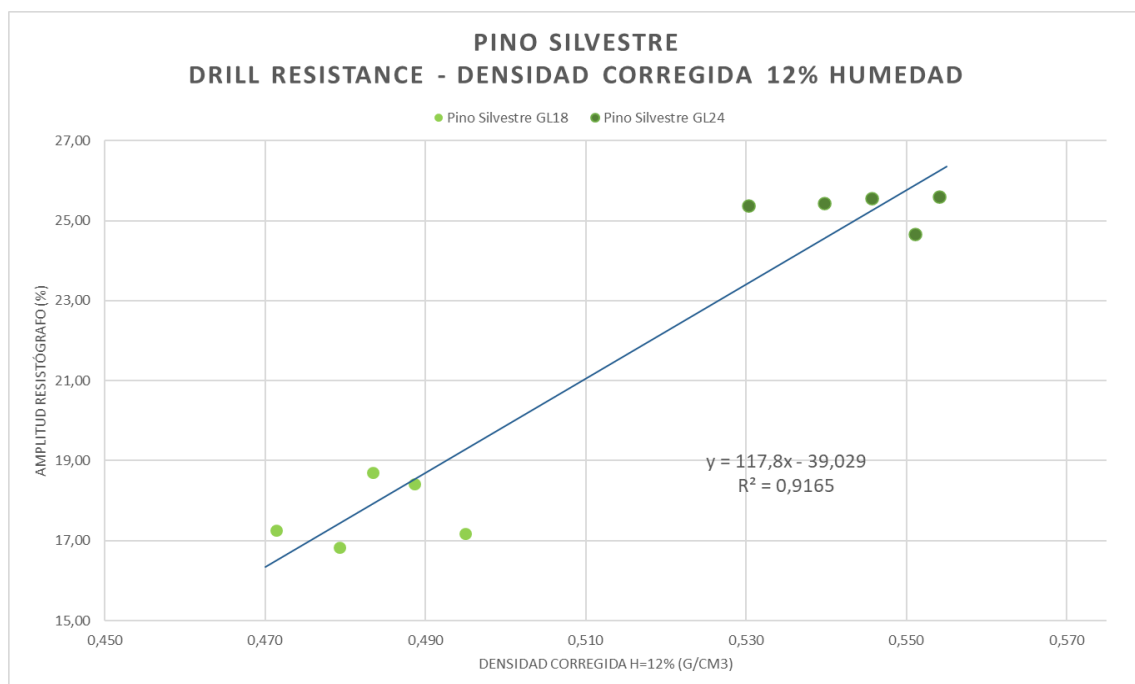


Figura 68. Pino Silvestre: Drill resistance - Densidad corregida al 12% humedad. (valores promedios para cada probeta).

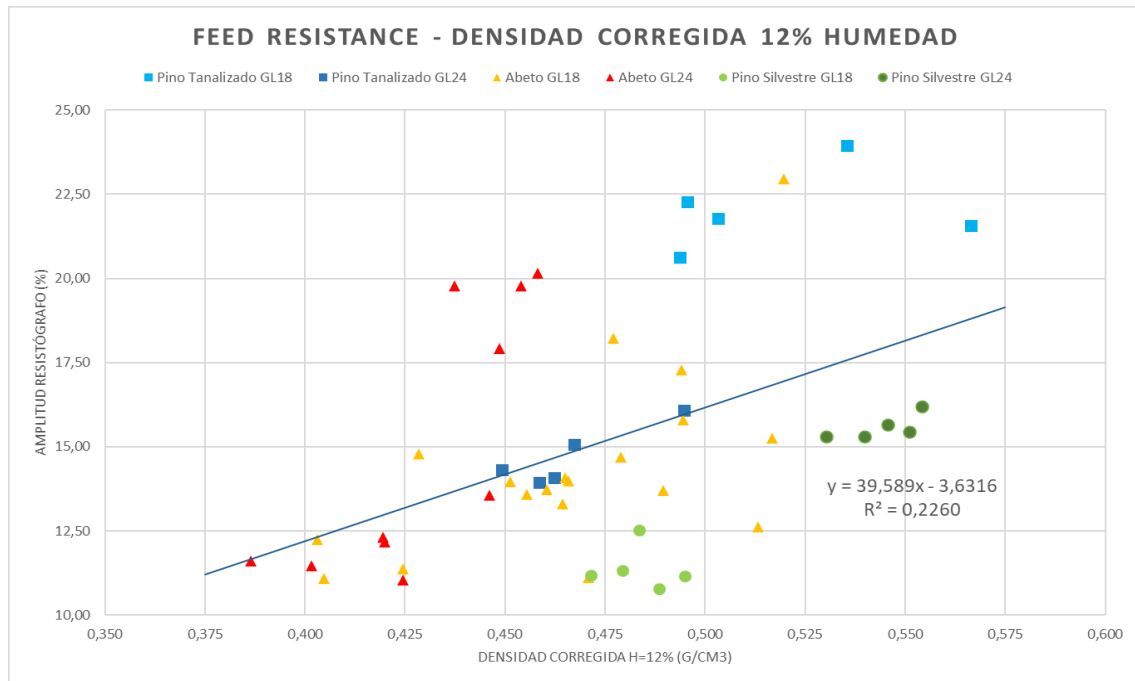


Figura 69. Feed resistance - Densidad corregida al 12% humedad (valores promedios para cada probeta).

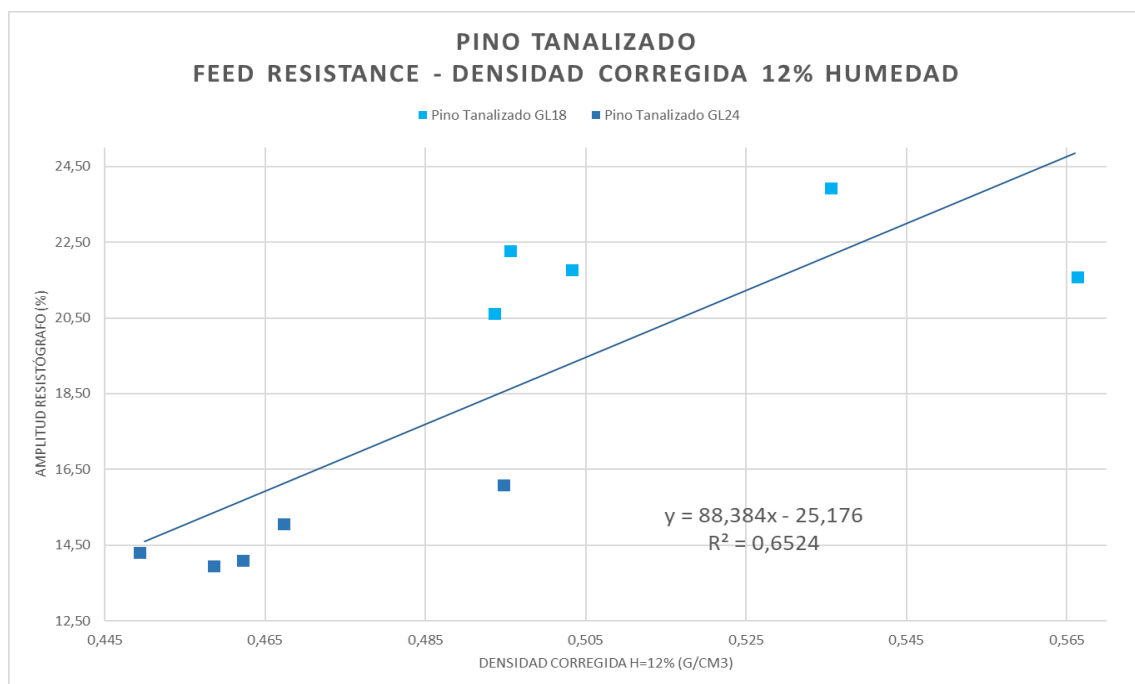


Figura 70. Pino Tanalizado: Feed resistance - Densidad corregida al 12% humedad (valores promedios para cada probeta).

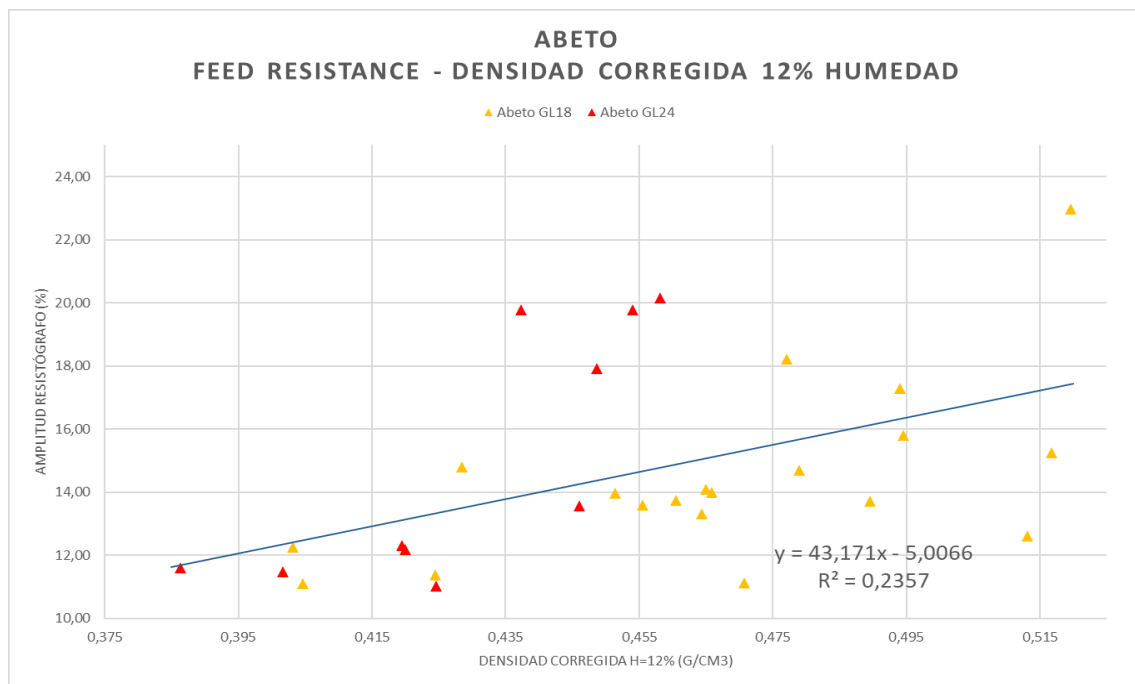


Figura 71. Abeto: Feed resistance - Densidad corregida al 12% humedad (valores promedios para cada probeta).

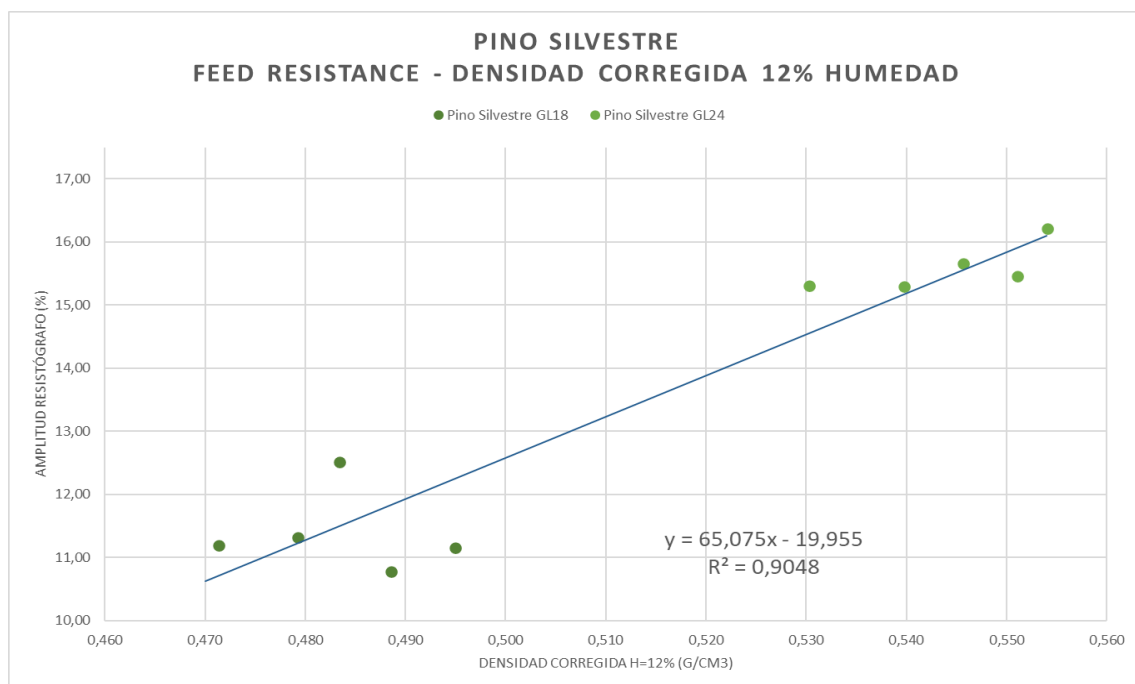


Figura 72. Pino Silvestre: Feed resistance - Densidad corregida al 12% humedad (valores promedios para cada probeta).

4.4 Velocidad de propagación de ultrasonidos Vs. Densidad

Se realizó un estudio de los valores obtenidos de velocidad de propagación, corregidos según la humedad interna de cada probeta, en dirección perpendicular a los planos de encolado de las rebanadas, comparándolos con la densidad, corregida al 12% de humedad. En la muestra obtenida, se ha prescindido de 2 valores extremos correspondientes a las probetas 69 (Pino silvestre GL18) y 48 (Abeto GL24).

El cruce de datos de densidad-velocidad ultrasónica incluye los gráficos con la propagación en sentido paralelo a los planos de encolado (**Figura 73 - Figura 76**), siendo sus resultados poco significativos ya que, los valores de US medidos corresponden únicamente a la lámina central de la viga (sin afectar encolados), mientras que los valores de densidad son globales. Como consecuencia obtenemos un coeficiente R^2 significativamente más bajo y una distribución más dispersa.

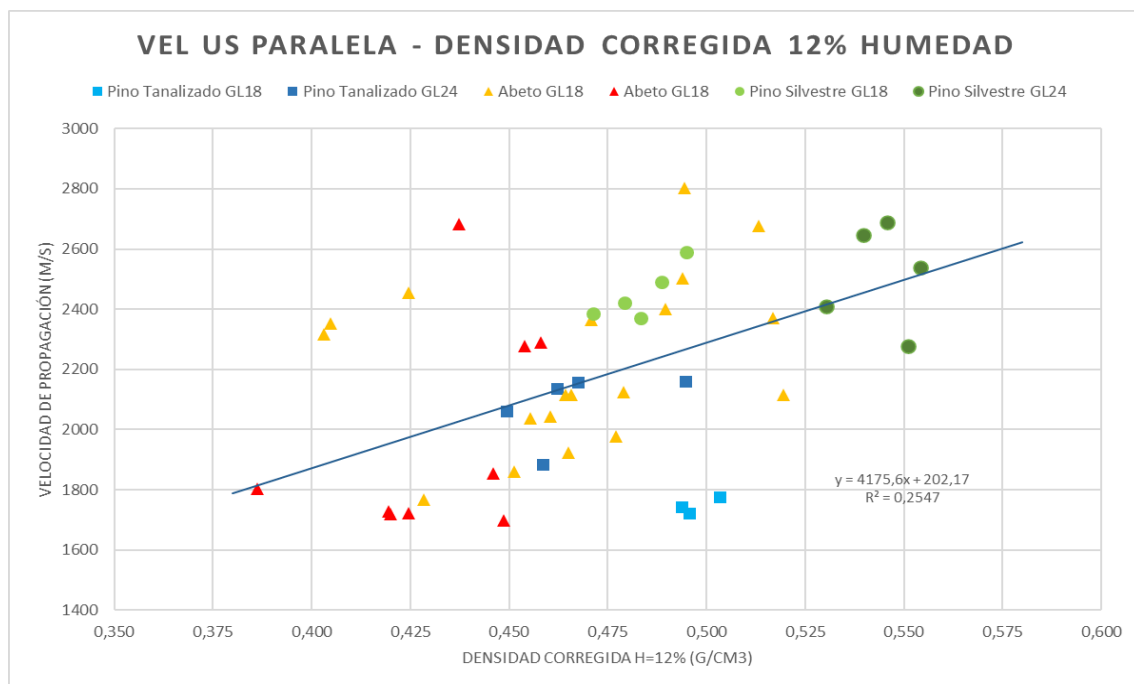


Figura 73. Velocidad de propagación paralelo a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.

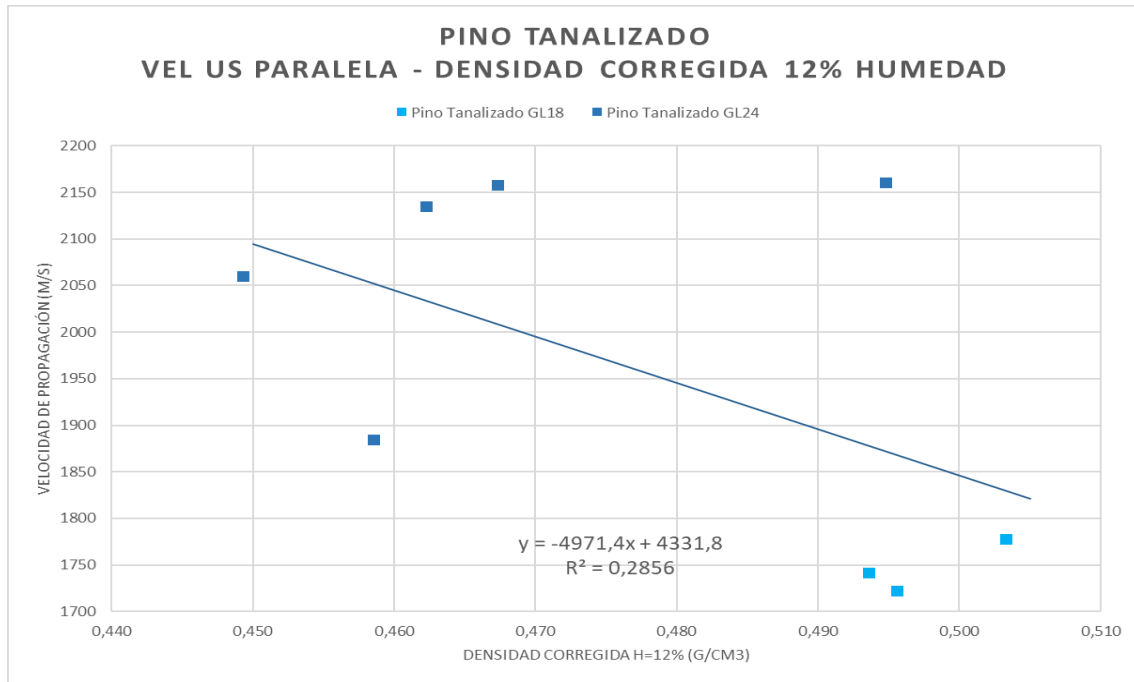


Figura 74. Pino Tanalizado: Velocidad de propagación paralelo a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.

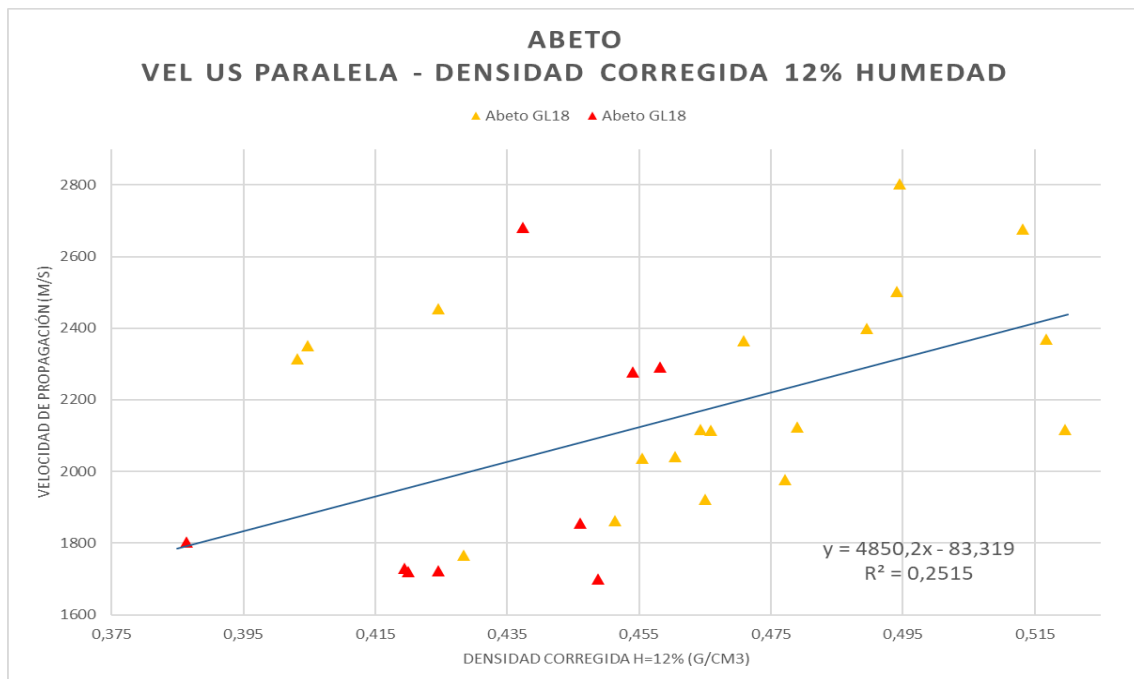


Figura 75. Abeto: Velocidad de propagación paralelo a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.

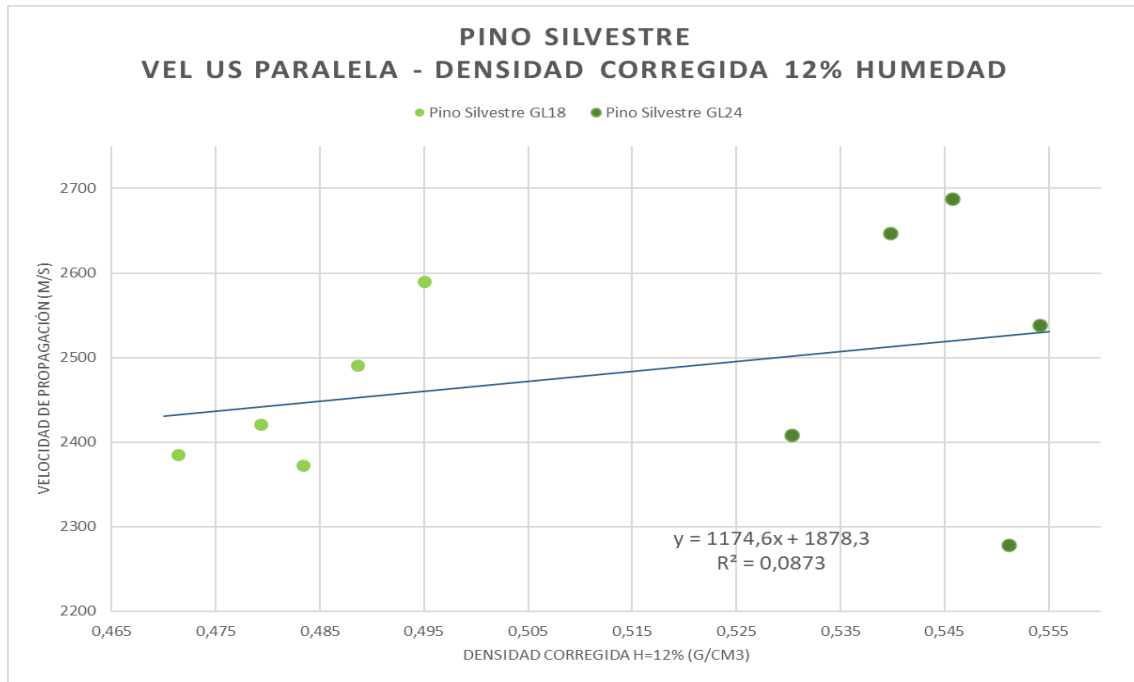


Figura 76. Pino silvestre: Velocidad de propagación paralela a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.

En el caso de US perpendicular vs. Densidad (**Figura 77**), se observa una tendencia clara a una regresión lineal. Dicha tendencia establece mayor velocidad de propagación cuanto mayor es la densidad.

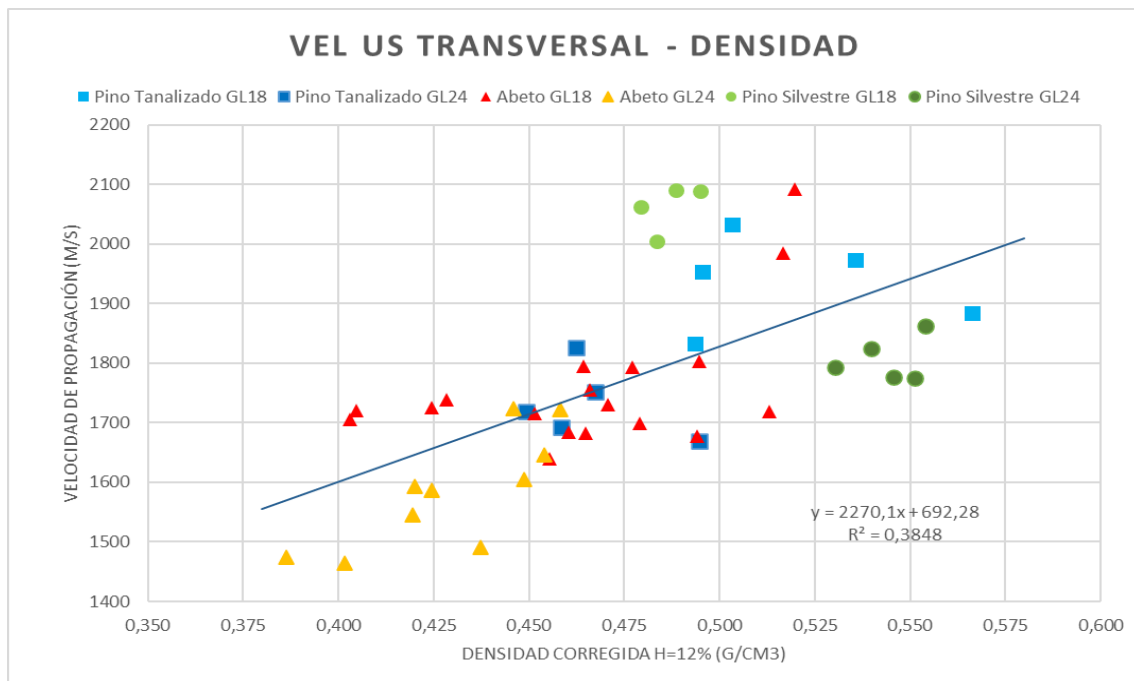


Figura 77. Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.

Discriminando por especies, el pino tanalizado y el abeto atienden a la afirmación anterior, (**Figura 78 y Figura 79**), respectivamente.

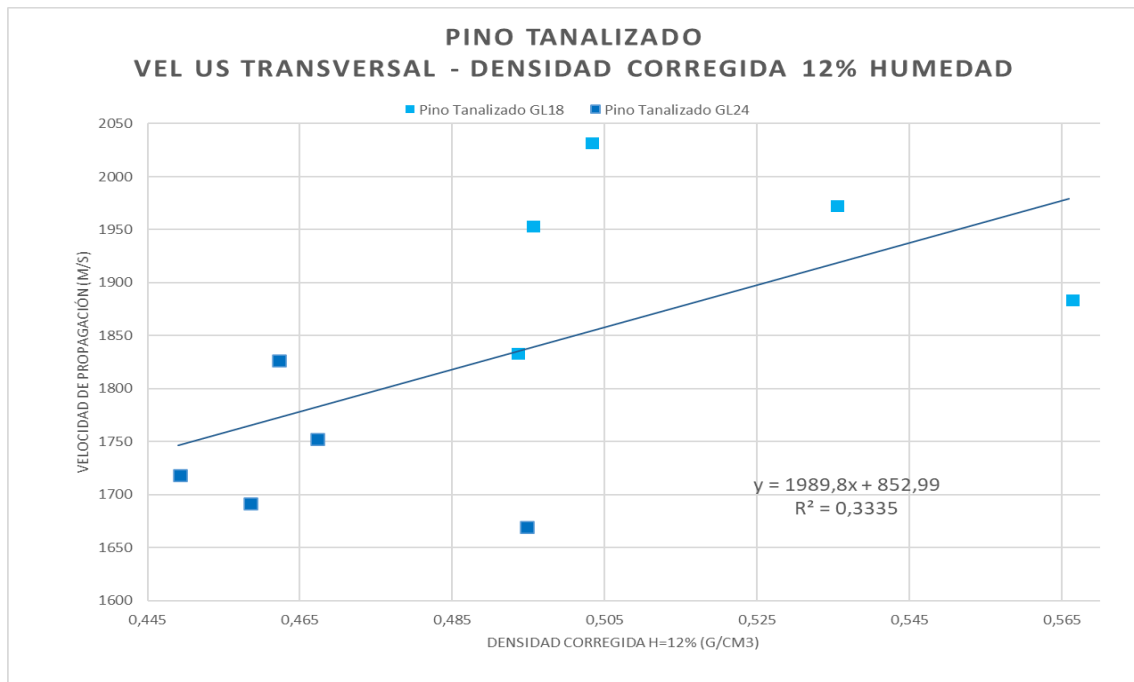


Figura 78. Pino Tanalizado: Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.

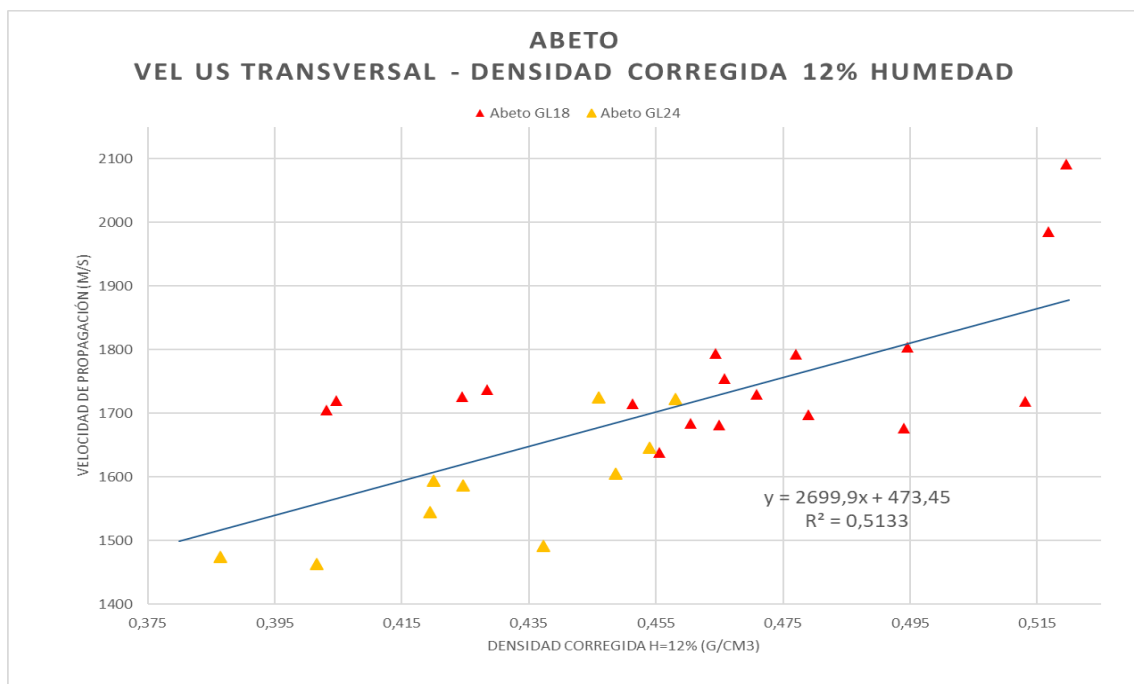


Figura 79. Abeto: Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.

Por su parte, en el caso del pino silvestre se aprecia que la velocidad de propagación para el caso de la GL18 es mayor que para la GL24. Esta circunstancia resulta contradictoria, ya que a la luz del proceso de fabricación de las GL18 referido por Yofra³⁸ (partiendo de madera C24 de los laterales de los troncos, con más discontinuidades, preferentemente nudos), debiera de haberse obtenido menos velocidad de propagación, **Figura 80**. Por tanto, el presente resultado no se considera significativo/concluyente.

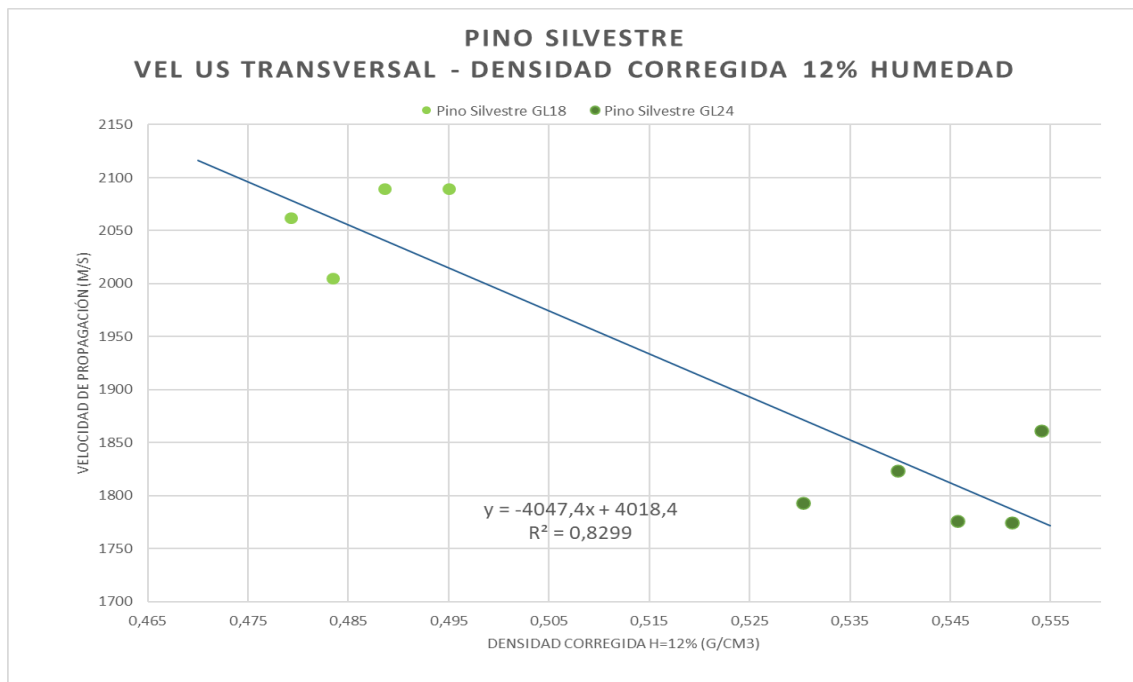


Figura 80. Pino Silvestre: Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado - Densidad corregida al 12% humedad.

4.5 Resistografía Vs. Velocidad de propagación de ultrasonidos

A la hora de cruzar los datos obtenidos mediante los ensayos de propagación de ultrasonidos en dirección perpendicular a los planos de encolado y las medias de amplitud resistográfica para *drill* y *feed resistance* del material, se observa que, en el caso de la resistencia a la perforación, **Figura 81 - Figura 86**, se obtiene una aproximación más precisa que con los datos de resistencia al avance. La razón es la misma que se ha expuesto anteriormente, la curva *feed resistance* nos proporciona, fundamentalmente, una ayuda cualitativa para la identificación de cavidades.

Analizando los datos Drill resistance - V_{US} se observa que hay una fuerte relación entre velocidad de propagación y resistencia a la perforación, precisamente porque ambos están relacionados con la densidad de la probeta. Sin embargo, la probeta 69 (pino silvestre GL18), como en el caso de los ultrasonidos comparados con la densidad, contrariamente a lo razonable, sufre el efecto inverso, **Figura 85**. No se encuentra explicación aparente para que una probeta, con una densidad media, tenga el mejor comportamiento de todas las ensayadas en términos de velocidad de propagación y que, al mismo tiempo, sea la que ofrezca menor resistencia a la

³⁸ Ver párrafo final del apartado 4.2. Densidad Vs. Clase resistente

perforación, **Figura 81**. Por ello, se subraya que los resultados obtenidos para el caso del pino silvestre GL18 no resultan significativos.

Derivado de lo anterior, la **Figura 82** ilustra los mismos datos que la Figura 81 una vez eliminados los resultados alcanzados en la referida probeta 69, pudiendo comprobar la significativa mejora sufrida en términos de R^2 .

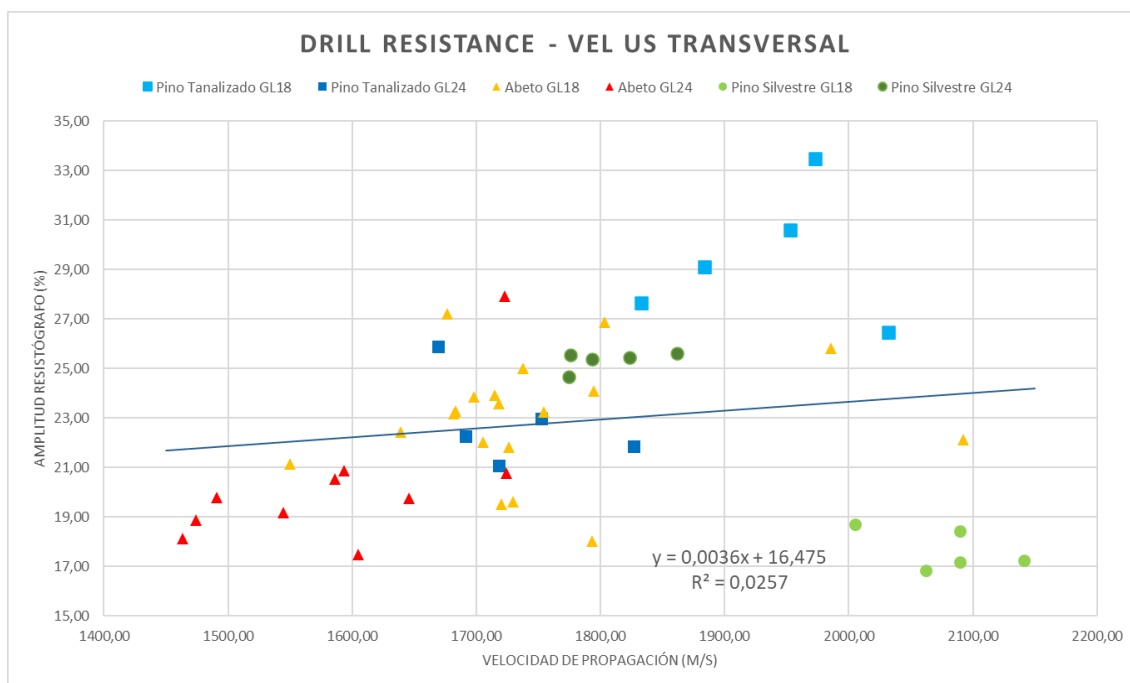


Figura 81. Drill resistance - Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado.

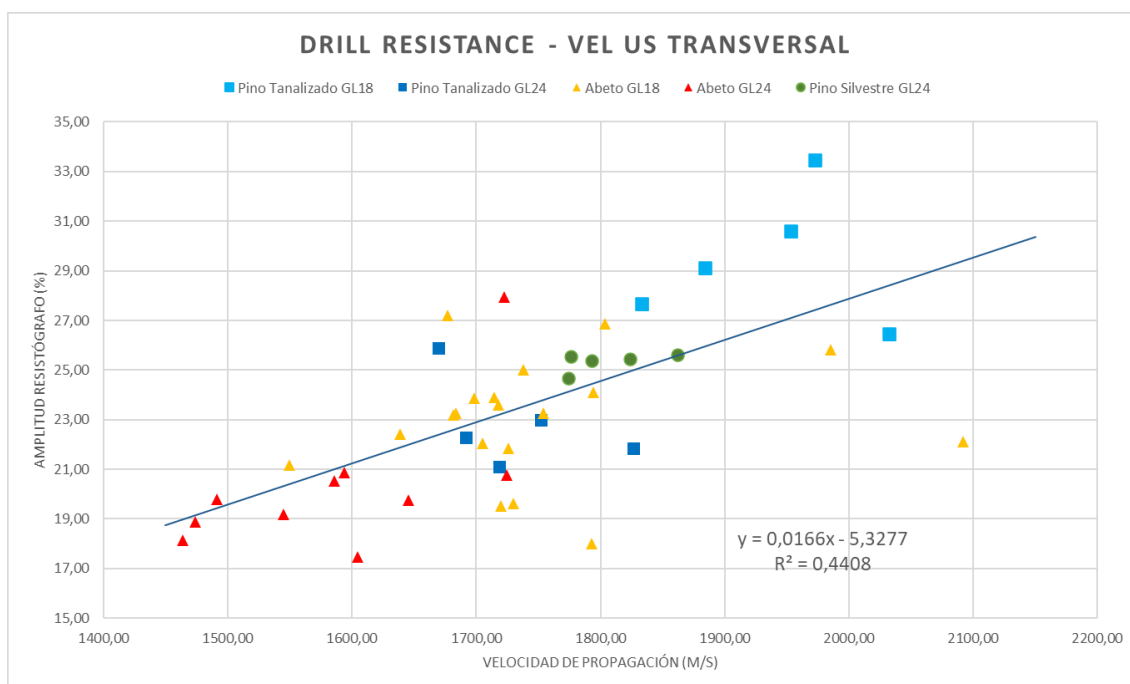


Figura 82. Drill resistance - Velocidad propagación perpendicular a planos de encolado (Probeta 69 excluida).

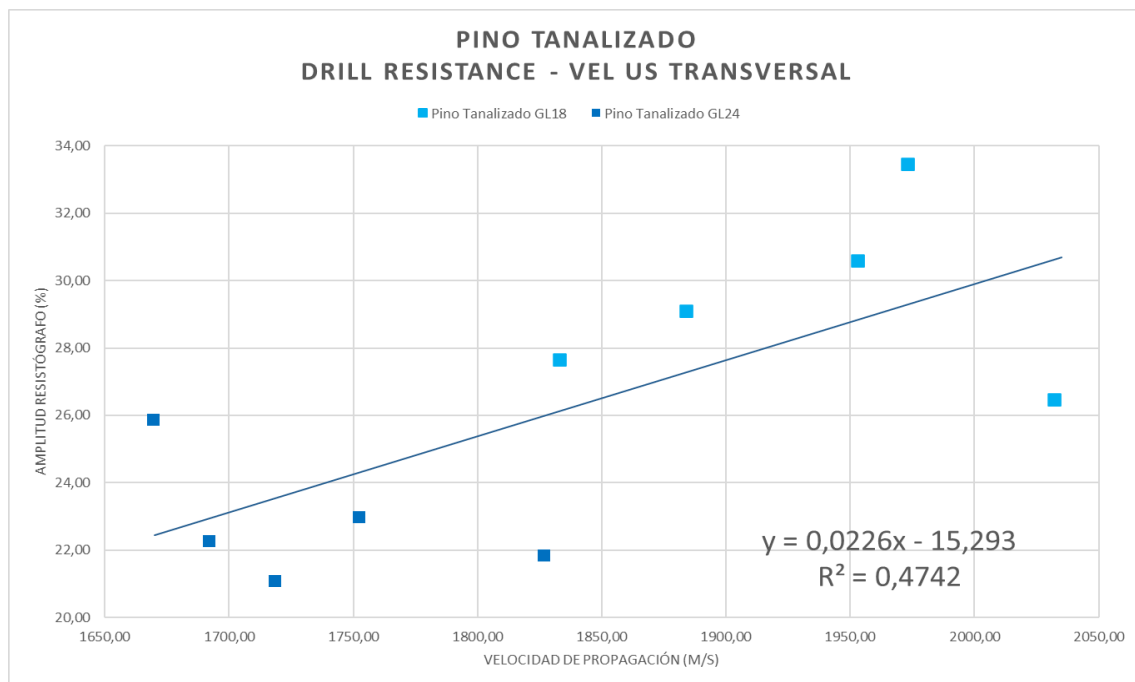


Figura 83. Pino Tanalizado: Drill resistance - Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado.

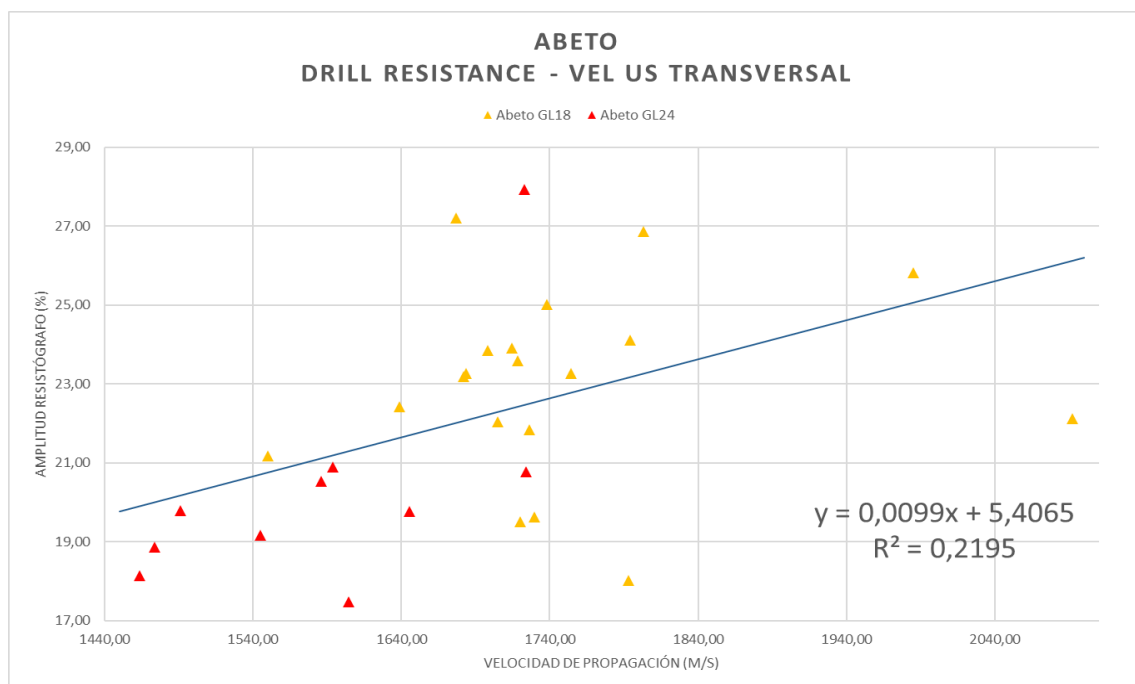


Figura 84. Abeto: Drill resistance - Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado.

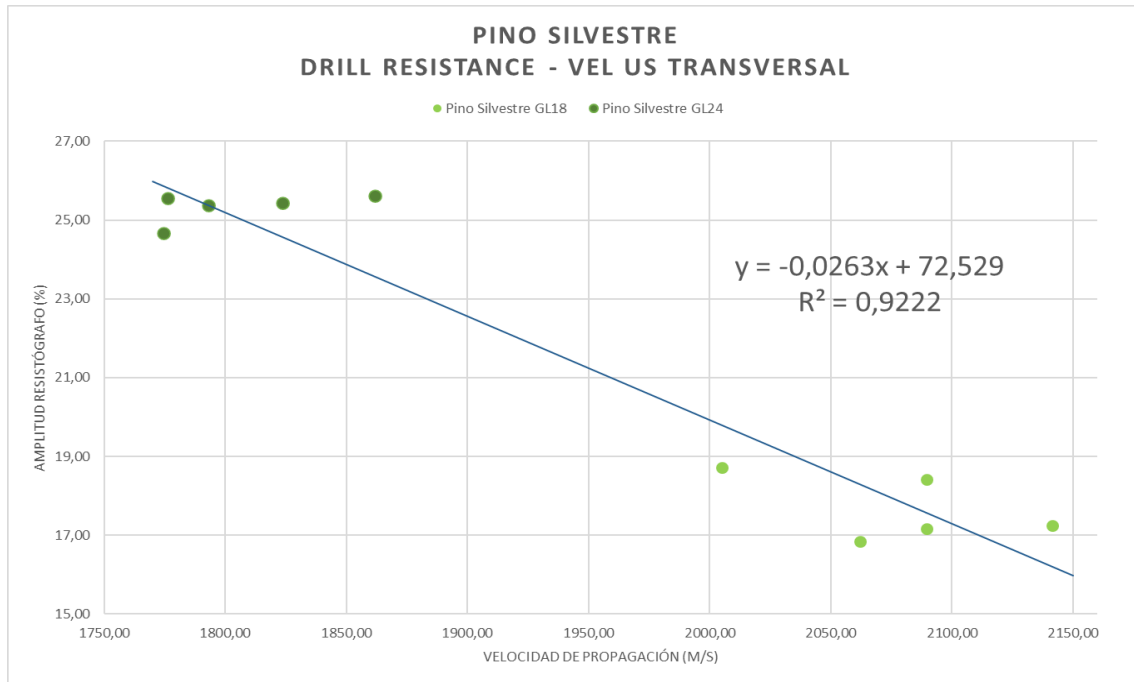


Figura 85. Pino Silvestre: Drill resistance - Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado.

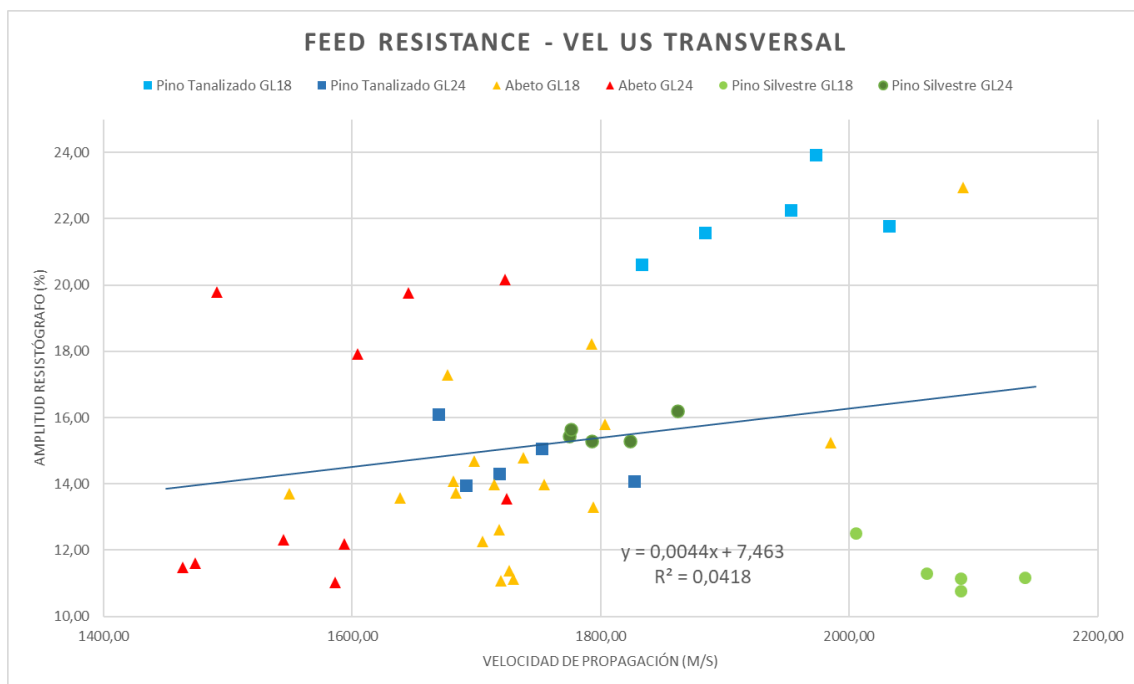


Figura 86. Feed resistance - Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado.

4.6 Resistografía Vs. Humedad estufa

Con la finalidad de determinar la posible influencia de la humedad en la resistencia a perforación se enfrentaron los resultados obtenidos de humedad por secado en estufa y las amplitudes resistográficas. En caso de que la hipótesis resulte afirmativa, pretende establecerse un patrón de comportamiento y algún tipo de corrección de los datos. Así, en las **Figura 87** **Figura 88** se

representan los valores de resistencia a la perforación y al avance frente a la humedad de la probeta.

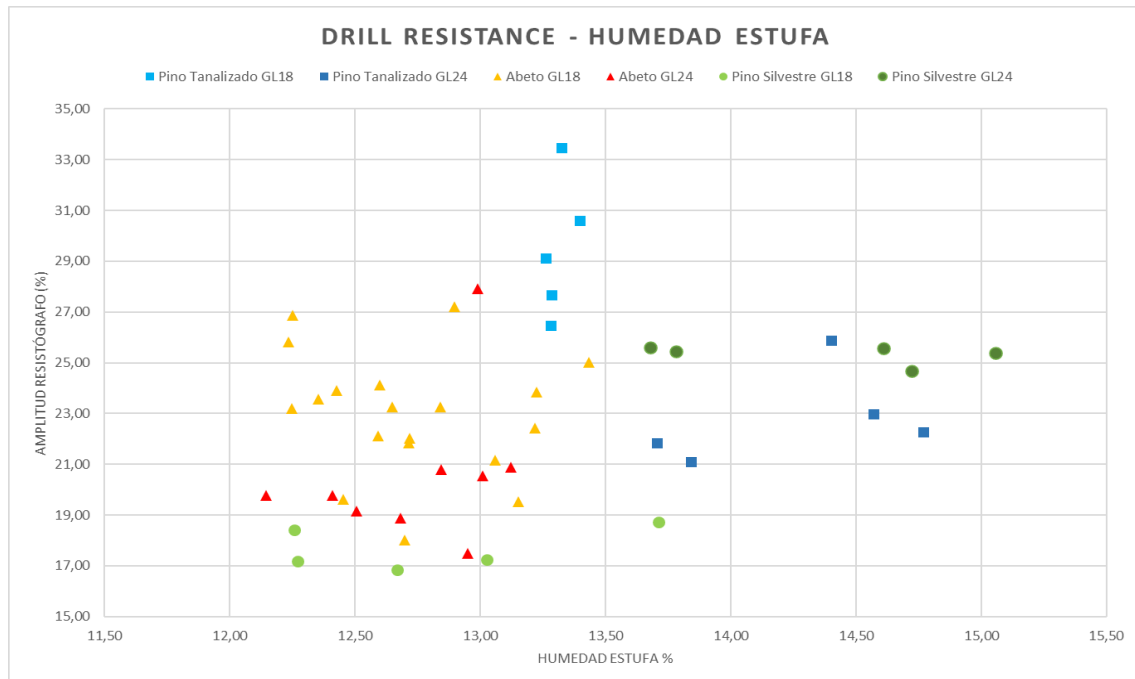


Figura 87. Drill resistance - Humedad estufa.

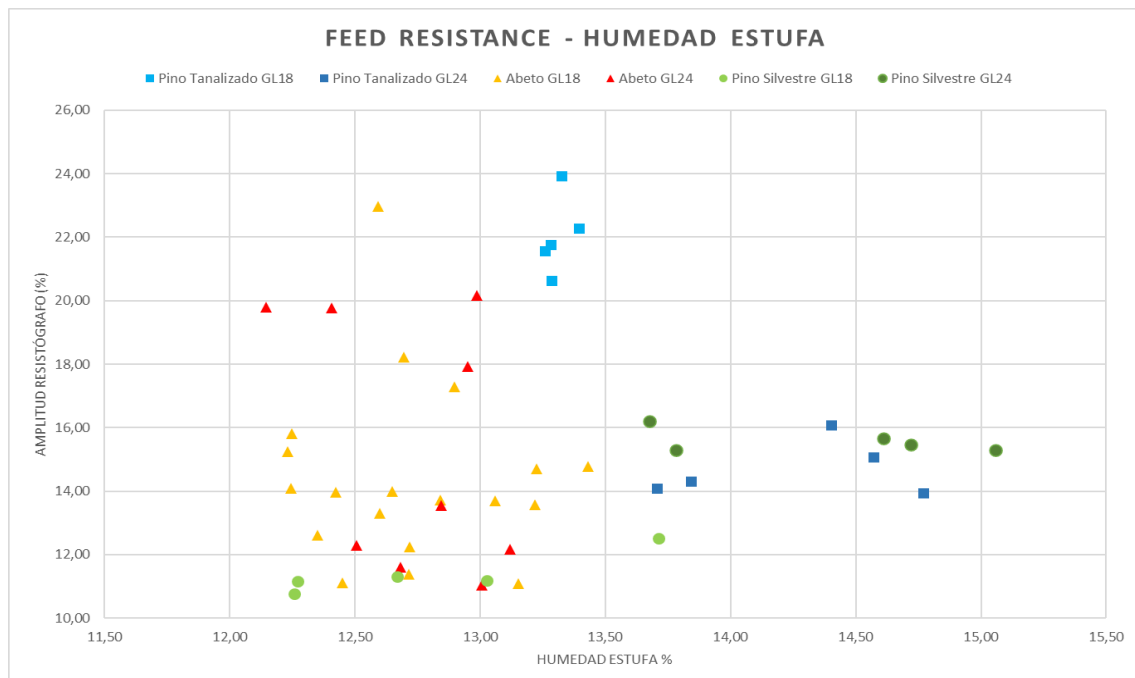


Figura 88. Feed resistance - Humedad estufa.

En ambas figuras podemos ver que, salvo en el caso del pino tanalizado GL18, las tendencias diferenciadas por especie y clasificación resistente son relativamente horizontales. Esto puede significar que un valor medio de amplitud resistográfica para cada especie y clase resistente,

puede corresponderse con valores bastante dispares de humedad. Por lo tanto, a priori, parece que la humedad ni incrementa, ni atenúa la resistencia frente a la perforación o avance.

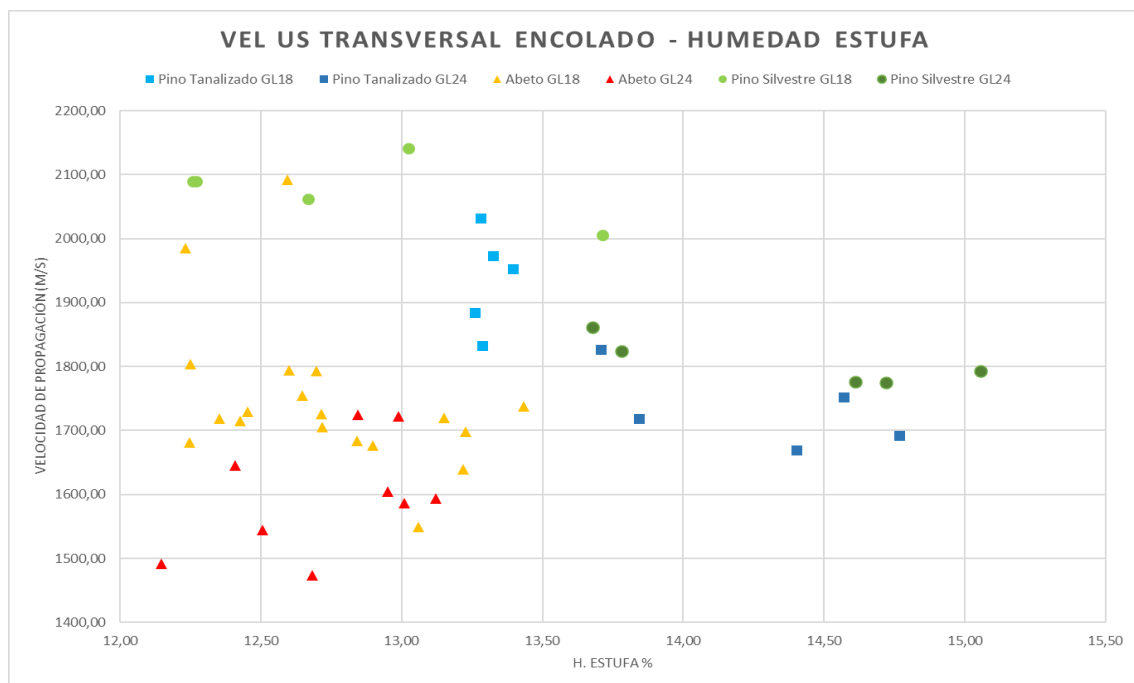
Como ya se ha referido, a modo de excepción al comportamiento general, para las 5 rebanadas extraídas de la viga de pino tanalizado GL18 la distribución es prácticamente vertical, puesto que para un valor de humedad rondando los 13,3% se obtienen diferentes medias de amplitud resistográfica.

4.7 Velocidad de propagación de ultrasonidos Vs. Humedad estufa

Al igual que con los valores resistográficos, se ha intentado buscar una correlación de la humedad con la velocidad de propagación (**Figura 89 y Figura 90**).

Es cierto que algunos estudios [48] sugieren que, para la madera aserrada, por cada un 1% que se incrementa la humedad, la velocidad de propagación se reduce un 0,8%. En el caso del estudio, al haberse ejecutado en madera laminada, hay que tener en cuenta que, aunque se ha realizado un acondicionamiento de la madera en cámara climática, cada una de las láminas no presentan el mismo comportamiento, ni contenido de humedad y por eso vemos que los datos muestran una tendencia relativamente horizontal (salvo en el caso del pino tanalizado GL18), **Figura 89**, como ocurría en el caso del ensayo resistográfico referido en el apartado anterior.

Además, para una misma especie los valores de humedad como mucho difieren en un 3%, lo que, siguiendo con la referencia antes mencionada, supondría un decrecimiento de 2,4% de la velocidad de propagación, que sobre un valor de 2000 m/s, darían una baja de 48 m/s, prácticamente inapreciable en los datos obtenidos, ya que la propia heterogeneidad de las probetas podría ser la causa de los diferentes valores de velocidad de propagación obtenidos.



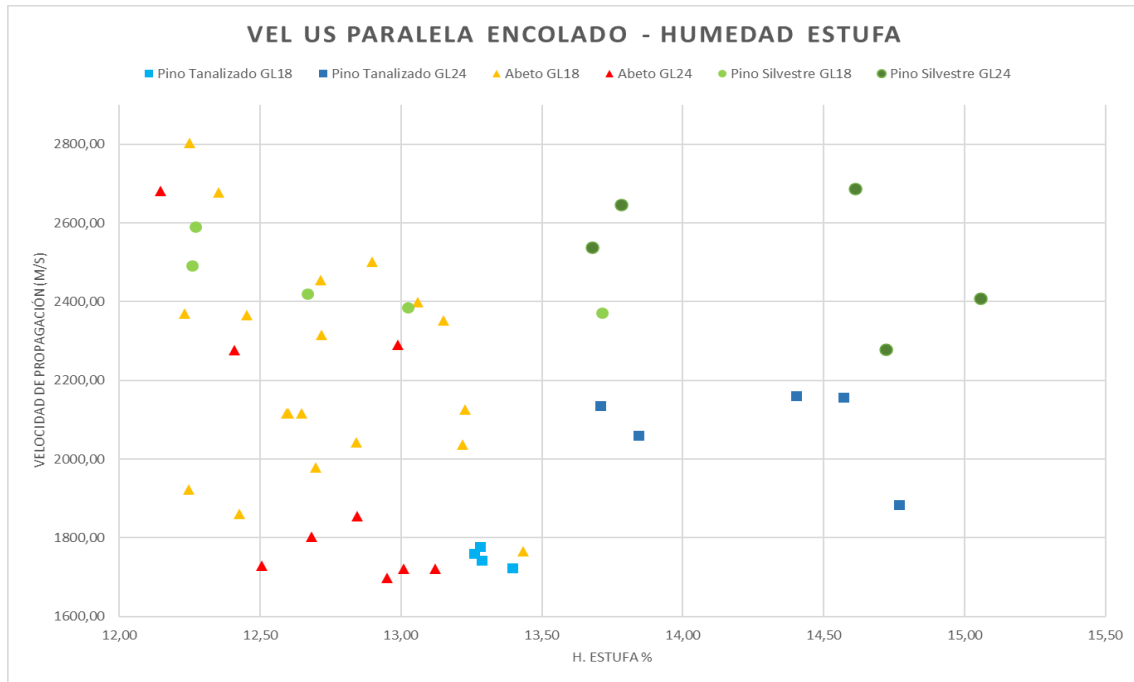


Figura 90. Velocidad de propagación paralelo a planos de encolado - Humedad estufa.

Es interesante hacer la comparativa de los datos de humedad de xilohigrómetro correspondientes a la tabla central, que es la misma tabla en la que se ha desarrollado el ensayo de ultrasonidos en sentido paralelo a los planos de encolado de la probeta, **Figura 91**.

Se observa que no es nada concluyente ni que los datos siguen una tendencia clara, la causa puede ser el rango de precisión del xilohigrómetro, comentada previamente.

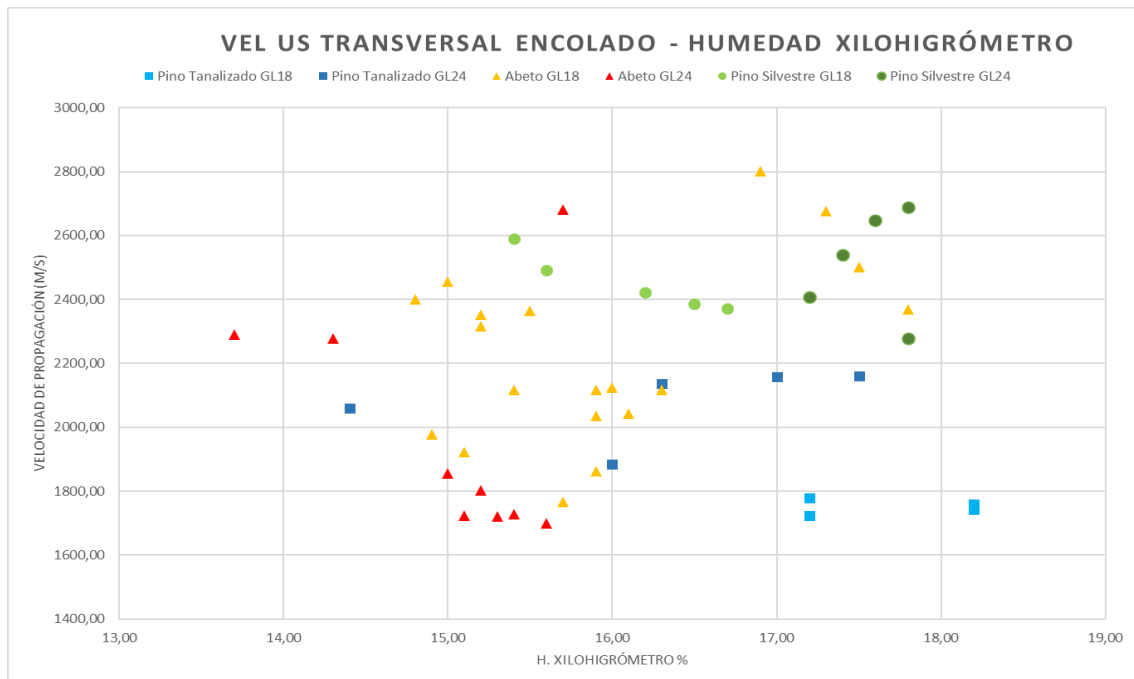


Figura 91. Velocidad de propagación paralelo a planos de encolado - Humedad xilohigrómetro.



Capítulo 5

Campaña de ensayos en *in situ*

5.1 Introducción

5.2 Pasarela de Las Fraguas

5.3 Pasarela de Nueva Montaña

Santander

5.4 Pasarela de Villasuso de Cieza

5 Campaña de ensayos in situ

5.1 Introducción

En el presente capítulo se muestra una primera aproximación a la aplicación in situ de las técnicas no destructivas desarrolladas en laboratorio para la caracterización de estructuras de madera laminada (Glulam). La metodología fue aplicada sobre 3 pasarelas situadas en la CC.AA. de Cantabria, en los municipios de Fraguas, Villasuso de Cieza y Santander.

La elección de realizar ensayos en 3 pasarelas fue un intento de determinar la posible afección de las condiciones atmosféricas a las que se ven expuestas en distintos periodos de tiempo. La pasarela ubicada en Fraguas fue construida hace un año, la de Nueva Montaña (Santander) hace 10 y la de Villasuso de Cieza hace 20 años.

En los siguientes apartados se dará una descripción detallada de la ubicación de las estructuras y los ensayos realizados sobre las mismas.

5.2 Pasarela de Las Fraguas (1 año de antigüedad)

5.2.1 Ubicación

La pasarela se encuentra ubicada en la localidad de Las Fraguas, término municipal de Arenas de Iguña, uniendo los márgenes del Río de los Llares o Valdeiguña (afluente del río Besaya) (Figura 92).



Figura 92. Ubicación de pasarela en el municipio de Las Fraguas (Arenas de Iguña).³⁹

³⁹ Fuente: Google Earth, 2021.

5.2.2 Detalle constructivo

En la **Figura 93** se observan el alzado y las plantas (superior e inferior) de la pasarela diseñada por Yofra. La pasarela se encuentra realizada en madera de pino tanalizado GL28. La **Figura 94** muestra una vista in situ de la pasarela.

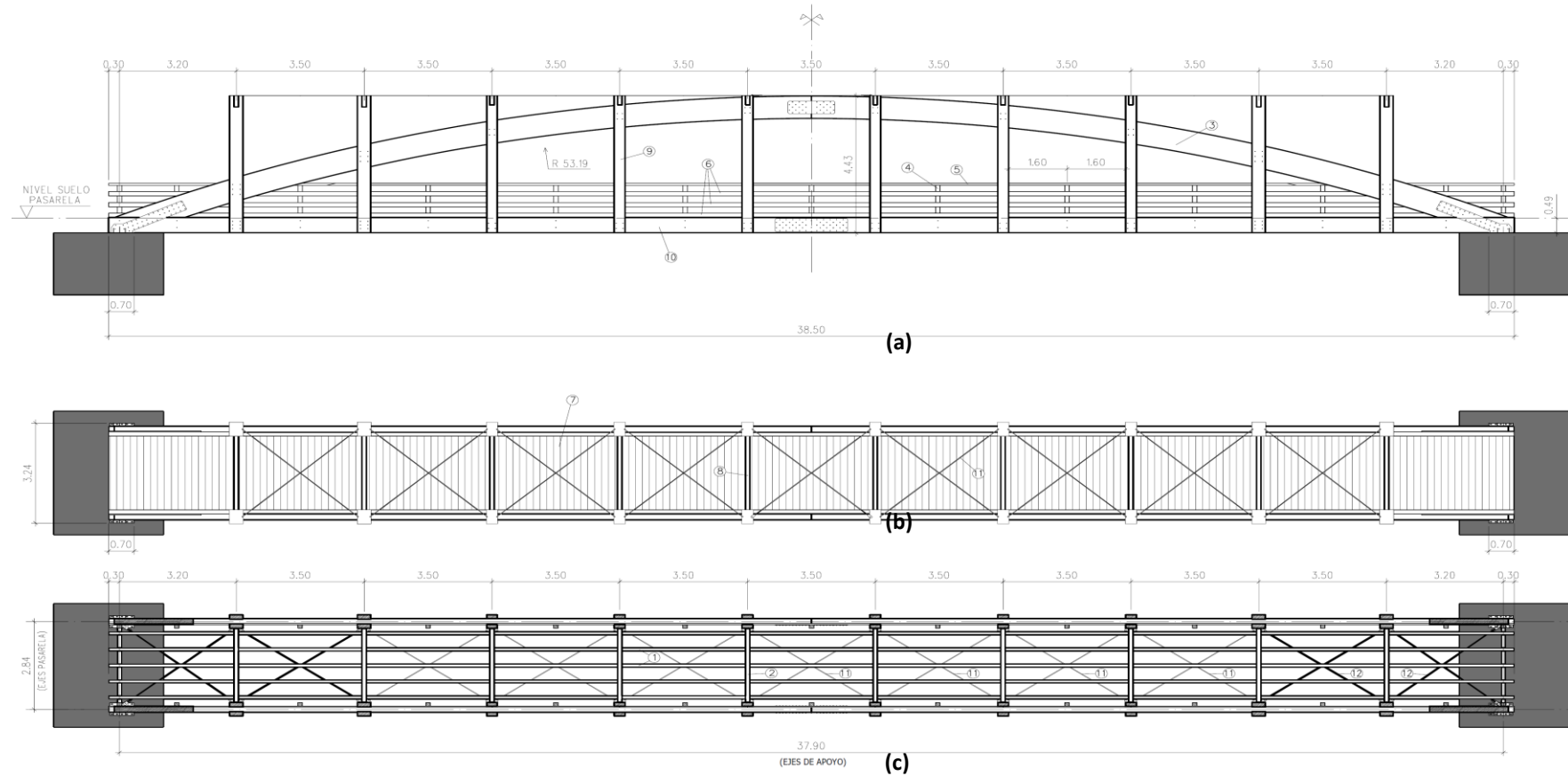


Figura 93. Detalle constructivo de pasarela ubicada en las Fraguas. (a) Alzado. (b) Planta superior. (c) Planta inferior. Fuente: Yofra.



Figura 94. Imagen perspectiva in situ de la pasarela ubicada en Las Fraguas.

5.2.3 Ensayos ultrasónicos

En la **Figura 95** se observan los 4 puntos donde se han realizado ensayos ultrasónicos sobre la pasarela. Estos puntos corresponden con los arranques del arco, en dirección paralela y perpendicular a los planos de encolado. Se realizaron una media de 4 - 5 medidas en cada uno de los puntos, siendo cada una de estas el resultado del promedio de 12 medidas internas realizadas por el equipo.

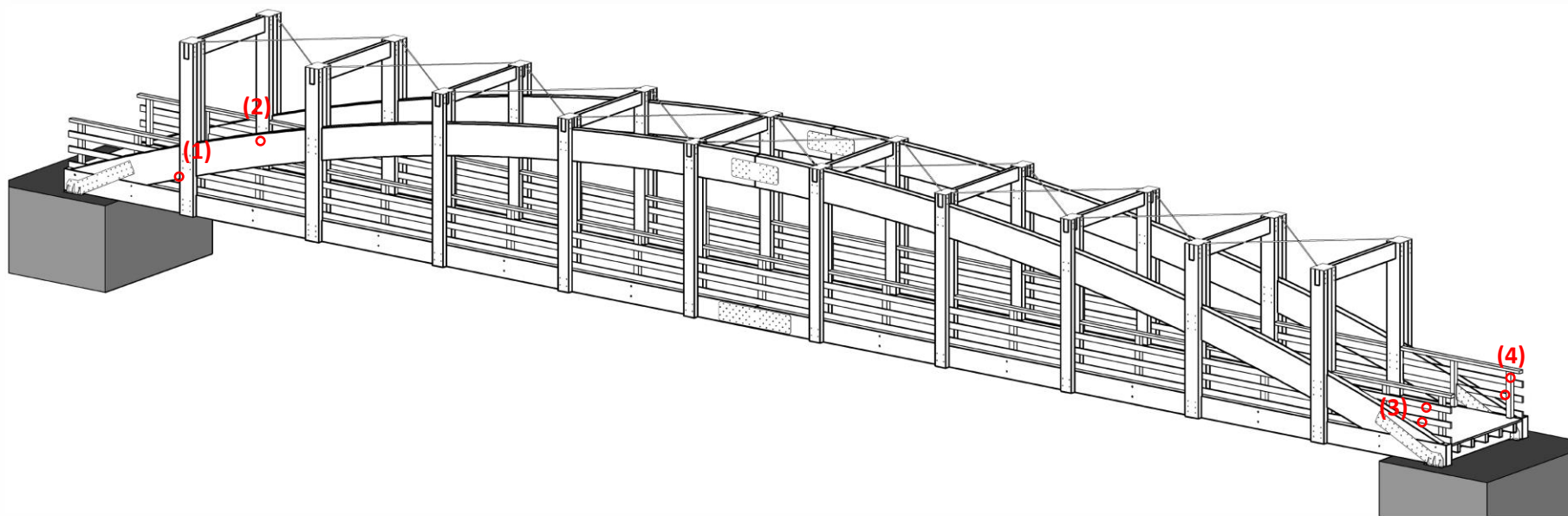


Figura 95. Ubicación de los puntos de ensayos ultrasónicos en vista en perspectiva de la pasarela ubicada en las Fraguas.

En la **Figura 96** se ilustran los instantes en los que se realizaron la medición del contenido de humedad mediante xilohigrómetro, la preparación de los pretaladros y la ejecución de un ensayo ultrasónico.



Figura 96. Detalle de ensayos ultrasónicos sobre pasarela ubicada en Las Fraguas. (a) Medición de humedad mediante xilohigrómetro, (b) Perforaciones para transductores ultrasónicos, (c) Medición de velocidad de propagación ultrasónica en dirección paralela a los planos de encolado.



5.2.3.1 Resultados

La **Tabla 14** recoge los valores medios obtenidos de la medición en los 4 puntos referidos en la **Figura 95**. La velocidad teórica corresponde con la velocidad media obtenida en condiciones de laboratorio para pino tanalizado GL28 (provenientes de una fase previa a los ensayos realizados en esta investigación, puesto que en la campaña de laboratorio sólo se estudiaron GL18 y GL24).

Tabla 14. Valores obtenidos en dirección paralela y perpendicular a los planos de encolado en la pasarela ubicada en Las Fraguas. // Ensayo paralelo a los planos de encolado. ⊥ Ensayo perpendicular a los planos de encolado.

Punto	Longitud (cm)	Humedad (%)	Velocidad (m/s)	V _{corr,12% humedad} (m/s)	V _{laboratorio} (m/s)	Desviación respecto a V _{laboratorio} (%)
P1//	20	22,1	1721	1547	1677,07	7,76% ↓
P1⊥	76	24,7	-	-*	1365,92	-
P2//	20	18,9	2074	1931	1677,07	15,14% ↑
P2⊥	76	18	1358	1277	1365,92	6,51% ↓
P3//	20	19,6	1781	1645	1677,07	1,91% ↓
P3⊥	77	18,5	1063	994	1365,92	27,23% ↓
P4//	20	19,8	1734	1599	1677,07	4,66% ↓
P4⊥	75	19,8	1177	1085	1365,92	20,57% ↓

*Imposibilidad de realizar la medida por falta de acoplamiento.

5.2.3.2 Interpretación y discusión de los datos

Con los resultados recogidos en la **Tabla 14** se puede apreciar:

- La velocidad promedio de propagación en dirección paralela a los planos de encolado corregida al 12% de humedad es de 1681 m/s.
- La velocidad promedio de propagación en dirección perpendicular a los planos de encolado corregida al 12% de humedad es de 1118 m/s.
- La velocidad experimental es todos los casos, a excepción del ensayo P2// en dirección paralela, menor a la velocidad teórica.
- En el punto 2 en dirección paralela a los planos de encolado se observa una velocidad de propagación superior en unos 300 m/s a los otros puntos en dirección paralela a las fibras.
- En dirección perpendicular a los planos de encolado se observa una mayor dispersión en las velocidades obtenidas.
- El punto 1 en dirección perpendicular a los planos de encolado requiere de un estudio en profundidad para la determinación del origen de la falta de acoplamiento.
- Los puntos 2 en dirección paralela, 3 en dirección perpendicular y 4 en dirección perpendicular arrojan unas desviaciones respecto a los valores teóricos (estimados en laboratorio sobre elementos de madera nueva) de 15,14%; 27,23%; 20,57%, respectivamente. Se estima necesario la realización de un estudio más exhaustivo para explicar las desviaciones obtenidas.
- Debido a las condiciones no controladas in situ las desviaciones inferiores al 10% pueden considerarse aceptables.

5.2.4 Ensayos resistográficos

En la inspección de la pasarela, se realizaron perforaciones en sentido paralelo a los planos de encolado, **Figura 97 a)**, en los 4 puntos indicados anteriormente. Respecto a los ensayos en perpendicular al encolado, **Figura 97 b)**, debido a la uniformidad de valores obtenidos y el difícil acceso para realizar las perforaciones, se ha perforado sólo en uno de los estribos.

Se incluye un croquis, **Figura 98** indicando la ubicación de los ensayos resistográficos realizados, marcados en color rojo las perforaciones perpendiculares a los planos de encolado, y en color azul las que se realizaron paralelas a los planos de encolado.



(a)



(b)

Figura 97. Realización de perforaciones resistográficas. a) Paralelo a los planos de encolado. b) Perpendicular a los planos de encolado.

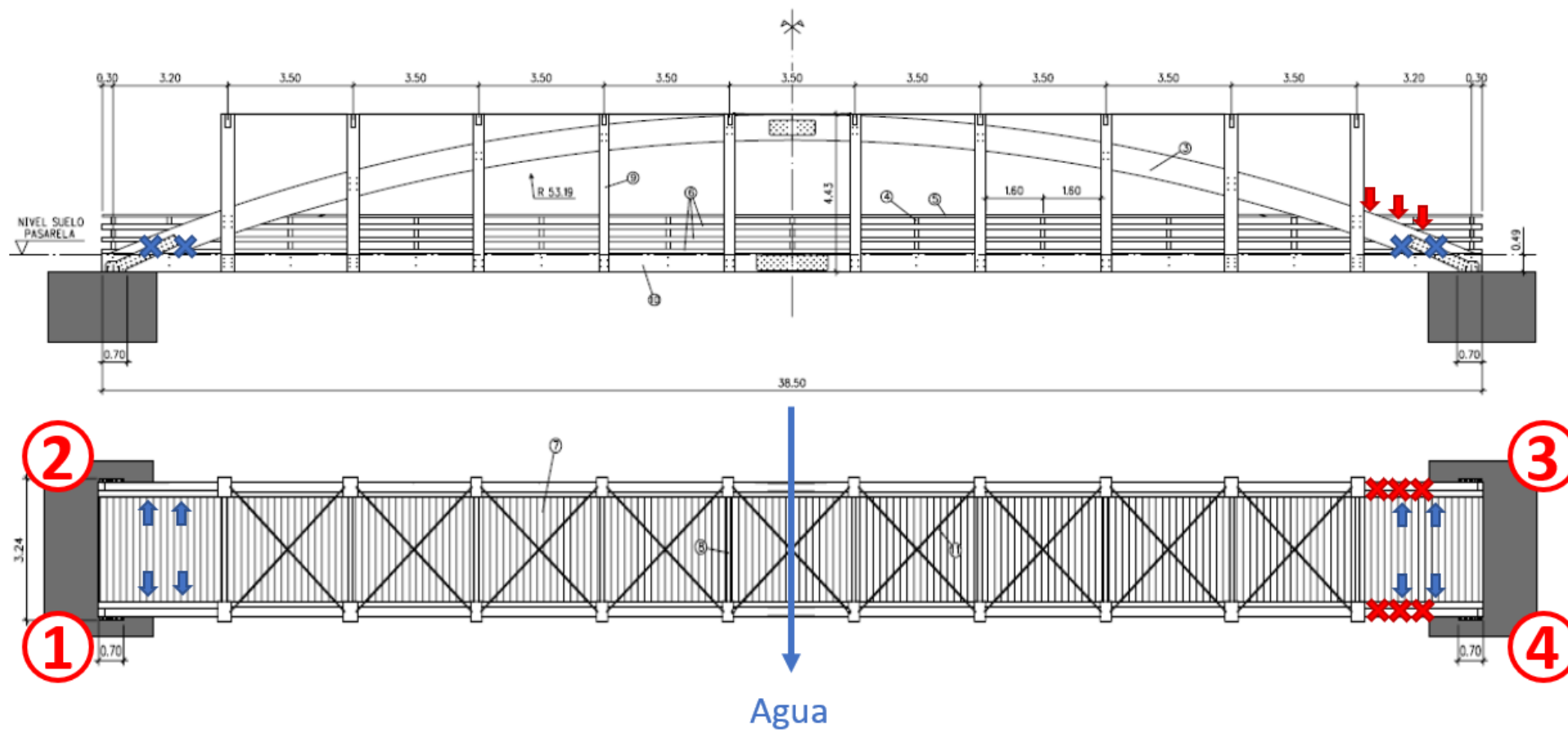


Figura 98. Ubicación de los ensayos en la pasarela de Las Fraguas.

5.2.4.1 Resultados

Los datos obtenidos de las perforaciones se muestran en la **Tabla 15**. En esta se incluyen los valores referentes al promedio de amplitud resistográfica y desviación típica de los valores.

Tabla 15. Pasarela Las Fraguas: Resultados resistográficos.

Dirección Perforación	Zona Pasarela	Posición	Resistografía (%)							
			Drill		Desviación Típica		Feed		Desviación Típica	
	1	1	22,00	21,99	4,62	4,91	13,72	13,70	2,78	2,88
		2	21,97		5,20		13,67		2,97	
	2	1	25,75	23,57	5,80	4,13	17,82	16,08	4,40	4,08
		2	21,39		2,46		14,35		3,76	
	3	1	24,90	24,53	3,63	2,81	13,77	13,55	2,12	2,30
		2	24,17		2,00		13,34		2,48	
	4	1	21,39	20,25	2,46	2,66	14,35	12,70	3,76	3,40
		2	19,10		2,85		11,04		3,03	
⊥	3	1	26,82	27,26	6,99	5,69	14,01	14,98	5,09	3,44
		2	26,99		6,70		14,41		3,15	
		3	27,98		3,38		16,51		2,90	
	4	1	29,94	25,27	3,22	3,42	18,82	16,24	3,05	3,32
		2	22,85		3,48		15,10		3,46	
		3	23,01		3,55		14,80		3,46	

5.3 Pasarela de Nueva Montaña, Santander (10 años de antigüedad)

5.3.1 Ubicación

La pasarela se encuentra ubicada en el barrio de Nueva montaña en el término municipal de Santander, suponiendo un paso elevado, respecto al tráfico rodado, para unir las aulas del CEIP Nueva Montaña con la pista deportiva que posee (**Figura 99**).



Figura 99. Ubicación de pasarela en el barrio Nueva Montaña (Santander).⁴⁰

⁴⁰ Fuente: Google Earth, 2021.

5.3.2 Detalle constructivo

En la **Figura 100** se muestra una perspectiva de la pasarela diseñada y construida por la empresa Yofra en Nueva Montaña. La pasarela está construida en Pino Silvestre GL24. La **Figura 101** muestra dos imágenes obtenidas durante la visita in situ a la pasarela.

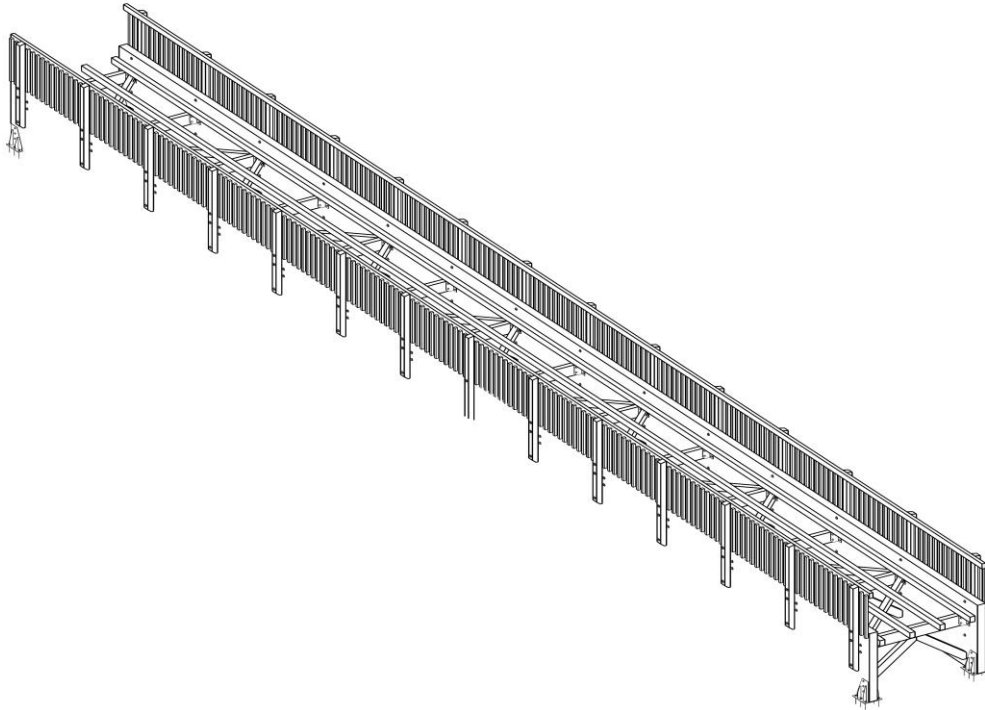


Figura 100. Detalle constructivo en perspectiva de pasarela ubicada en Nueva Montaña. Fuente: Yofra.



(a)



(b)

Figura 101. Imágenes in situ: (a) Vista inferior del tablero de la pasarela. (b) Perspectiva de la pasarela.

5.3.3 Ensayos ultrasónicos

En la **Figura 102** se muestran los puntos sobre los que se efectuaron los ensayos. Debido a las condiciones de contorno, y por falta de medios auxiliares que permitiesen la ejecución de ensayos directos, los ultrasonidos se realizaron en medición indirecta, es decir, con los transductores emisor y receptor situados en la misma cara de la viga.

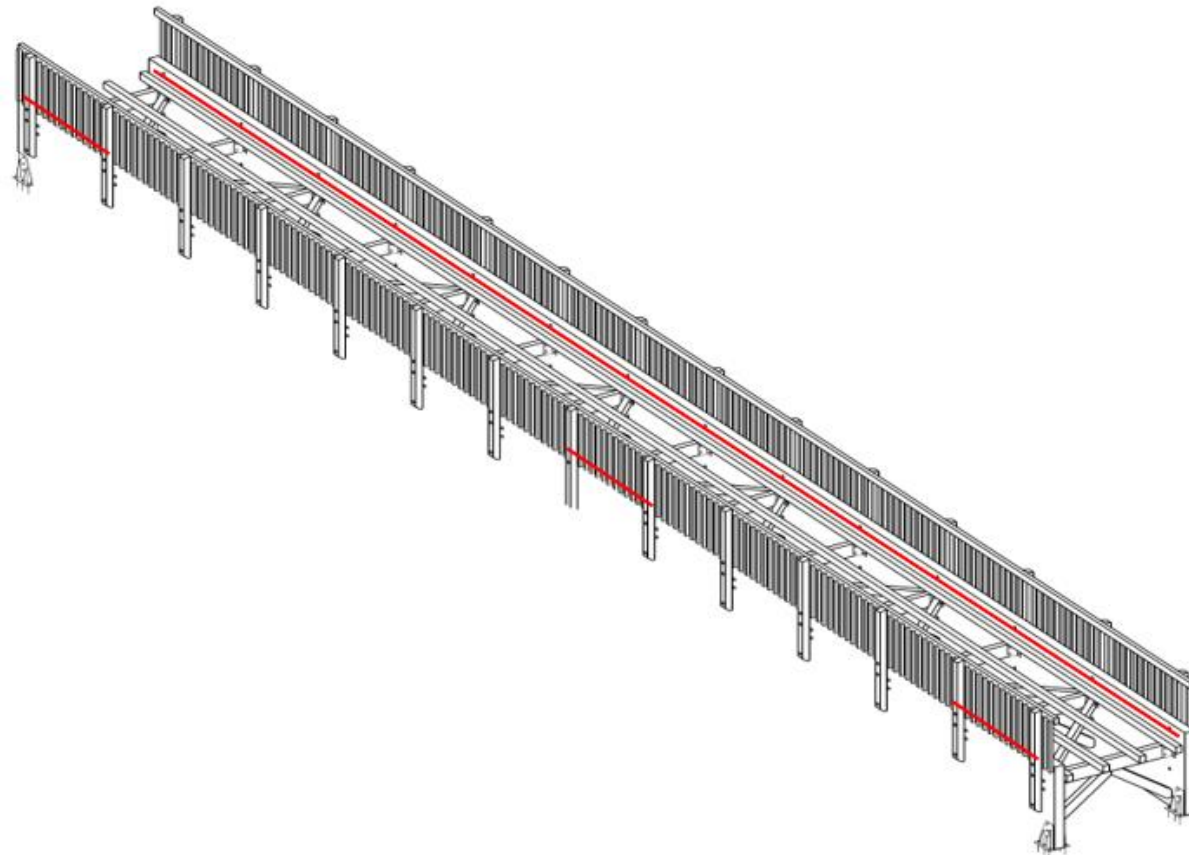


Figura 102. Ubicación de los puntos de ensayos ultrasónicos en vista en perspectiva de la pasarela ubicada en Nueva Montaña.

Se realizaron una media de 4 - 5 medidas en cada uno de los puntos, siendo cada una de estas el resultado de la media de 12 medidas internas realizadas por el aparato.

En la cara norte de la pasarela se realizaron medidas dejando fijo el transductor emisor y moviendo el receptor a una distancia de 50, 100 y 150 centímetros, y repitiendo este proceso hasta medir la longitud total (**Figura 103**).



Figura 103. Detalle de ensayo ultrasónico sobre pasarela ubicada en Nueva Montaña.

Se constataron errores en las medidas debido a los pernos roscados presentes en la viga (**Figura 104**), por lo que sobre la cara sur del elemento únicamente se obtuvieron medidas entre pernos roscados, en los extremos y en centro de luz.



Figura 104. Detalle de ensayo ultrasónico con perno roscado en situación intermedia (pasarela ubicada en Nueva Montaña).



5.3.3.1 Resultados

La **Tabla 16** recoge los valores medios obtenidos de la medición en los puntos referidos en la **Figura 102**.

Tabla 16. Valores obtenidos mediante medición indirecta en pasarela ubicada en Nueva Montaña

Punto 1	Punto 2	Longitud (cm)	Punto Xilohigrometría	Humedad (%)	Velocidad (m/s)
1	2	50	2	18,5	2904
1	3	100			3092
1	4	150			2772
4	5	50			2935
4	6	100			3473
4	7	150			3151
7	8	50	7	19,3	4109
7	9	100			3190
7	10	150			3366
10	11	50	11	> 30	3506
10	12	100			3489
10	13	150			4092
13	14	50	15	22,2	2709
13	15	100			3256
13	16	150			2570
16	17	50			1836
16	18	100			2183
16	19	150			2735
19	20	50	19	19,3	2689
19	21	100			2719
19	22	150			3393
22	23	50	23	> 30	3702
22	24	100			3255
22	25	150			3019
25	26	50			3449
25	27	100			3537
25	28	150			2762
29	30	50	27	> 30	3192
29	31	100			3150
29	32	150			3200
33	34	50	31	20,1	3376
33	35	100			3958
33	36	150			3803
37	38	50	35	21,2	2177
37	39	100			2803
37	40	150			2900
41	42	50	43	24,4	2565
41	43	100			3901
41	44	150			3070
45	46	50	47	18,7	3939
45	47	100			3218
45	48	150			2864
49	50	50	50	27	3051
49	51	100			2545
49	52	150			2069

Punto 1	Punto 2	Longitud (cm)	Punto Xilohigrometría	Humedad (%)	Velocidad (m/s)
53	54	50	54	18,5	2765
53	55	100			2408
56	57	50	57	23,6	2835
56	58	100			2862
59	60	50	60	20,4	4075
59	61	100			3272

5.3.3.2 Interpretación y discusión de los datos

De los resultados obtenidos en la **Tabla 16** se puede apreciar:

- Debido a la gran sensibilidad que poseen los transductores, cualquier ruido ambiental perturba las medidas, siendo necesario repetir los ensayos múltiples ocasiones para obtener lecturas no erróneas.
- En longitudes superiores a 1 metro, la frecuencia empleada por el equipo parece mostrarse demasiado elevada, atenuándose en su tránsito dentro de la estructura y, por ende, arrojando errores en las medidas con la consecuente incertidumbre.
- Los pernos roscados existentes en la viga provocan error en las medidas, debido a la reflexión de las ondas en ellos.
- Se considera necesario repetir la campaña experimental en la pasarela, realizando medidas únicamente entre tornillos y con distancias inferiores a las adoptadas.

5.3.4 Ensayos Resistográficos

En cada uno de los 4 puntos de inspección, las perforaciones en perpendicular se ejecutaron en 4 puntos separados unos 20 cm, mientras que para las perforaciones en dirección paralela a los encolados se optó por hacer 4 ensayos, separados 20 cm entre ellos, divididos en 2 zonas, una en la tabla superior y más expuesta de la estructura y otra en una lámina más interna, con el fin de comprobar si las láminas más externas registran menores amplitudes resistográficas. Todos ellos se han marcado sobre la estructura, como se ve en la **Figura 105**.



Figura 105. Señalización de puntos de perforación.

En ambas direcciones de perforación, cuando se ha dado el caso de obtenerse una lectura fuera de la tendencia general, se ha vuelto a efectuar una perforación próxima a la anterior con el fin de recoger más información. A estos ensayos repetidos se les ha llamado con la misma nomenclatura, pero añadiendo una comilla cada vez que se ha vuelto a ensayar la misma zona.

La **Figura 106** ilustra la ubicación de los ensayos resistográficos realizados, marcados en color rojo las perforaciones perpendiculares a los encolados, en azul las paralelas a los encolados en las láminas intermedias, y en verde las paralelas en las láminas superiores.

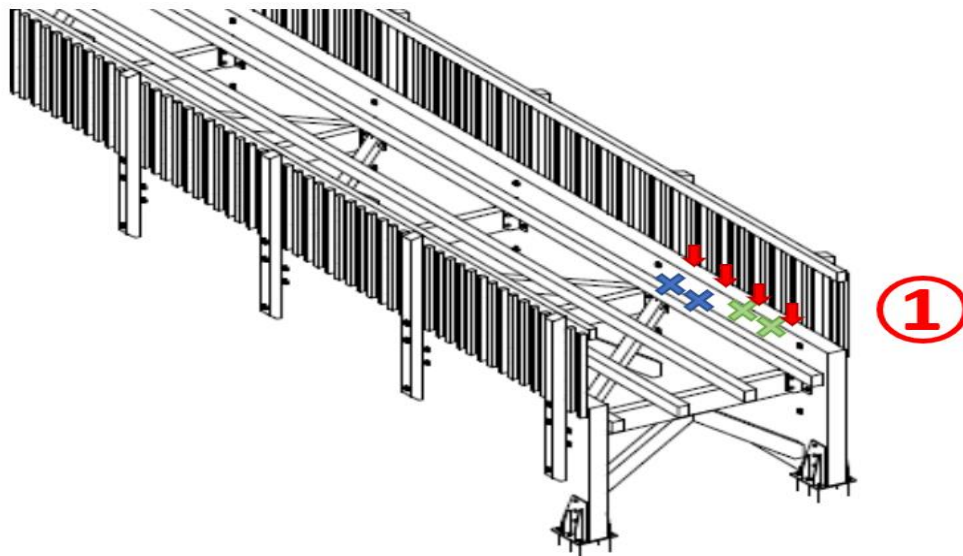


Figura 106. Ubicación de los ensayos en la pasarela de Nueva Montaña.

5.3.4.1 Resultados

Los resultados obtenidos de las perforaciones se muestran en la **Tabla 17**. Los datos están divididos en dos grandes bloques, en sentido paralelo y perpendicular.

Tabla 17. Pasarela Nueva Montaña: Resultados resistográficos.

Dirección Perforación	Zona Pasarela	Posición	N.º	Resistografía (%)							
				Drill		Desviación Típica		Feed		Desviación Típica	
	1	Sup	1	27,20	25,31	3,05	2,84	16,80	15,59	5,68	5,04
			2	23,41		2,63		14,38		4,39	
		Med	1	20,93	21,14	3,59	5,05	13,32	13,53	2,82	2,88
			2	21,36		6,50		13,74		2,95	
	3	Sup	1	34,84	24,71	8,06	5,47	15,48	16,09	1,80	4,40
			1'	20,60		5,29		16,05		5,22	
			2	18,70		3,04		16,76		6,19	
		Med	1	18,63	17,11	3,57	2,77	16,15	15,20	3,63	2,96
			2	15,60		1,98		14,26		2,30	
	4	Sup	1	22,36	34,03	2,77	11,29	13,49	12,67	4,95	4,44
			2	34,03		11,29		11,84		3,92	
		Med	1	42,97	32,60	11,67	8,74	16,43	16,96	2,50	4,43
			2	22,23		5,80		17,49		6,36	



				Resistografía (%)							
Dirección Perforación	Zona Pasarela	Posición	N.º	Drill		Desviación Típica		Feed		Desviación Típica	
⊥	1	1	20,81	21,30	3,36	4,44	11,03	9,61	3,24	2,91	
		2	21,29		3,42		10,02		2,98		
		3	22,55		5,97		8,58		3,03		
		4	20,54		5,00		8,80		2,38		
	2	1	23,28	23,35	7,01	6,74	17,39	17,19	6,69	5,80	
		2	23,78		6,91		17,25		3,55		
		3	23,00		6,89		17,40		6,89		
		4	23,32		6,15		16,71		6,09		
	3	1	16,48	23,10	2,26	4,63	13,19	11,96	5,44	3,21	
		1'	24,56		4,13		12,14		2,37		
		2	22,22		4,98		10,51		2,87		
		3	21,62		3,27		10,61		3,47		
		4	26,60		7,38		8,96		2,67		
		4'	27,84		6,10		12,20		1,06		
		4''	22,37		4,31		16,07		4,58		
	4	1	27,12	25,63	2,94	5,43	19,39	13,88	4,96	3,17	
		2	21,02		5,55		15,15		4,86		
		2'	28,76		7,79		13,69		3,76		
		2''	12,33		2,34		14,22		2,55		
		4	6,75		2,82		7,28		1,27		
		5	36,86		5,16		13,52		1,59		

Los casos que se muestran sombreados a rojo, quieren decir que en el ensayo no se ha conseguido una perforación ideal y por esta razón no se han contemplado para el cálculo del promedio. Vemos en el perfil resistográfico de la perforación Paralelo_4_Sup-1, **Figura 107**, que en el caso de la curva *drill resistance* (curva en rojo) el cálculo de la media de amplitud resistográfica no debería ser tomado para el promedio global, ya que tiene una tendencia creciente que llega hasta la sobrecarga, siendo el valor promedio poco representativo de los datos. No ocurre esto para la información proporcionada por la curva *feed resistance* (curva azul) que da valores más constantes.

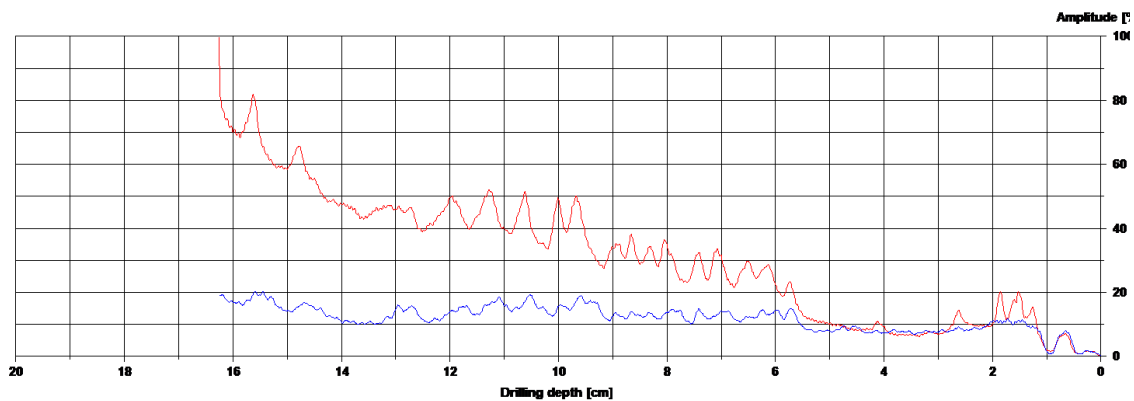


Figura 107. Perfil resistográfico de la perforación Paralelo_4_Sup-1.

Aprovechando la visualización de la gráfica anterior percibimos que, en el primer centímetro, hay un decrecimiento de los valores de la resistencia al avance y a la perforación, siendo prácticamente nulos. En la **Figura 108**, se puede intuir la razón de lo ocurrido. La longitud de perforación que corresponde a los valores de baja amplitud resistográfica coinciden con el área que se encuentra tras la superficie lateral. En esta zona, también se percibe una fisura que parte desde la parte superior y debe de tener profundidad suficiente para haberse registrado en los datos de perforación.



Figura 108. Visualización de la zona de perforación con diferentes fisuras del ensayo Paralelo_4_Sup-1.

Los casos de los ensayos Perpendicular_4_Sup-2'', 4 y 5, no se han considerado para el cálculo del promedio por la misma razón que en el caso anterior: sobrecarga del equipo.

5.3.4.2 Puntos singulares

Tras realizar todos los ensayos, se han hecho resistografías en 3 puntos singulares de la pasarela. En los casos de las singularidades de las **Figura 109 a)** y **c)**, que presentan daños superficiales, en las gráficas resistográficas de las **Figura 110** y **Figura 112**, se observa por la falta de valores bajos de amplitud resistográfica, que este deterioro no penetra dentro de la estructura. Por su parte, en el caso de la singularidad de la **Figura 109 b)**, correspondiente a la unión entre láminas, se verifica con el perfil resistográfico de la **Figura 111** que esta zona no es una interfase débil.

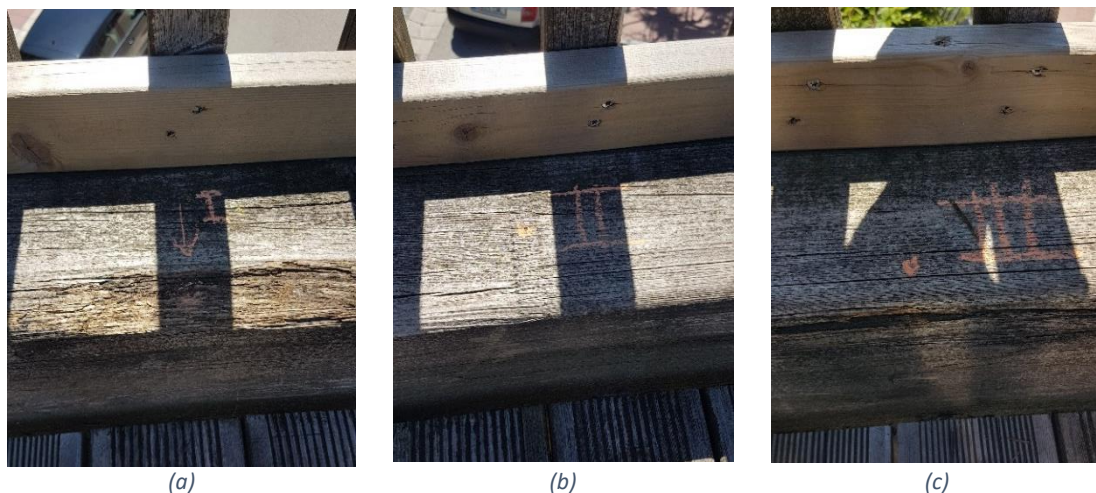


Figura 109. Puntos de inspección singulares. a) Deterioro superficial. b) Fingers de unión. c) Deterioro en la zona lateral.

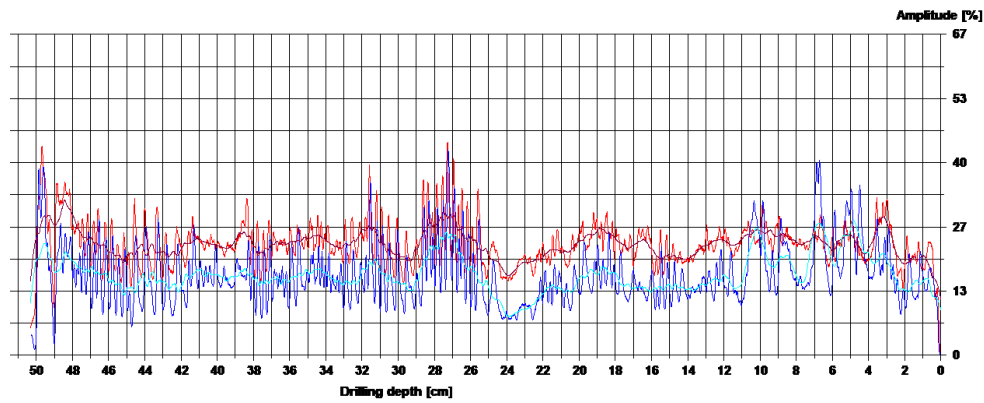


Figura 110. Perfil resistográfico Singularidad 1.

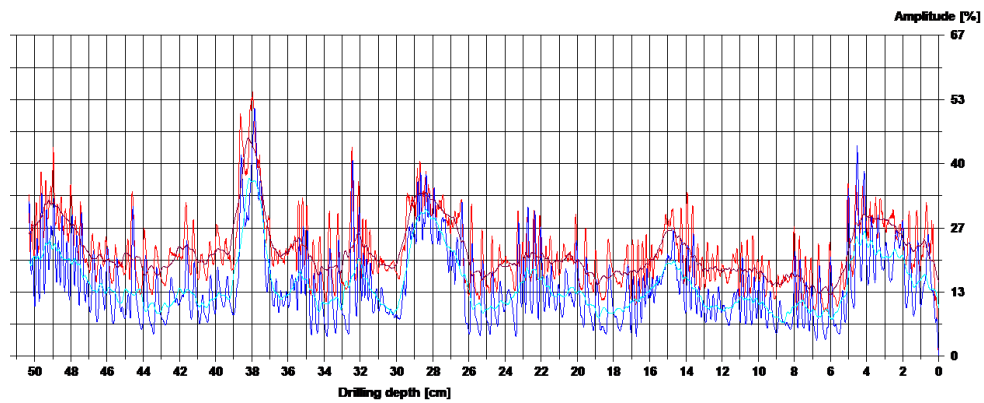


Figura 111. Perfil resistográfico Singularidad 2.

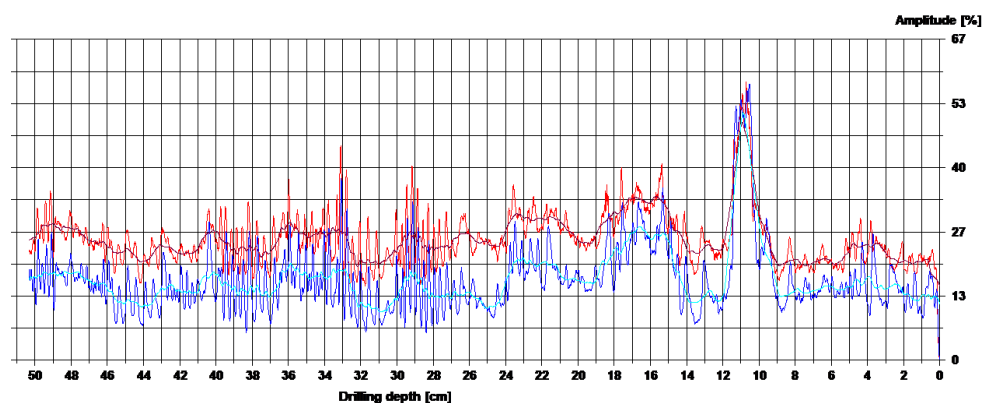


Figura 112. Perfil resistográfico Singularidad 3.

En la **Tabla 18** podemos ver los valores resistográficos de estos puntos marcados como singularidades, referentes a promedio de la amplitud resistográfica y desviación típica de los perfiles *drill* y *feed resistance*, son similares a los obtenidos para los ensayos en dirección perpendicular ejecutados en esta pasarela, **Tabla 17**.

Tabla 18. Valores medios de amplitud resistográfica y desviación típica para drill y feed resistance.

Perforación	Resistografía (%)			
	Drill	Desviación Típica	Feed	Desviación Típica
Sing 1 ⊥	23,10	4,57	15,92	3,05
Sing 2 ⊥	20,77	3,79	13,40	4,05
Sing 3 ⊥	24,53	3,86	15,65	4,14

5.4 Pasarela de Villasuso de Cieza (20 años de antigüedad)

5.4.1 Ubicación

La pasarela se encuentra la localidad de Villasuso en el término municipal de Cieza, uniendo los márgenes del río Cieza (afluente del río Besaya) (**Figura 113**).



Figura 113. Ubicación de pasarela en la localidad de Villasuso (Cieza).⁴¹

⁴¹ Fuente: Google Earth, 2021.

5.4.2 Detalle constructivo

La **Figura 114** muestra una vista en alzado de la pasarela ubicada en Villasuso de Cieza. La pasarela esta realizada en Pino sin clasificación. La **Figura 115** es una perspectiva in situ de la estructura.

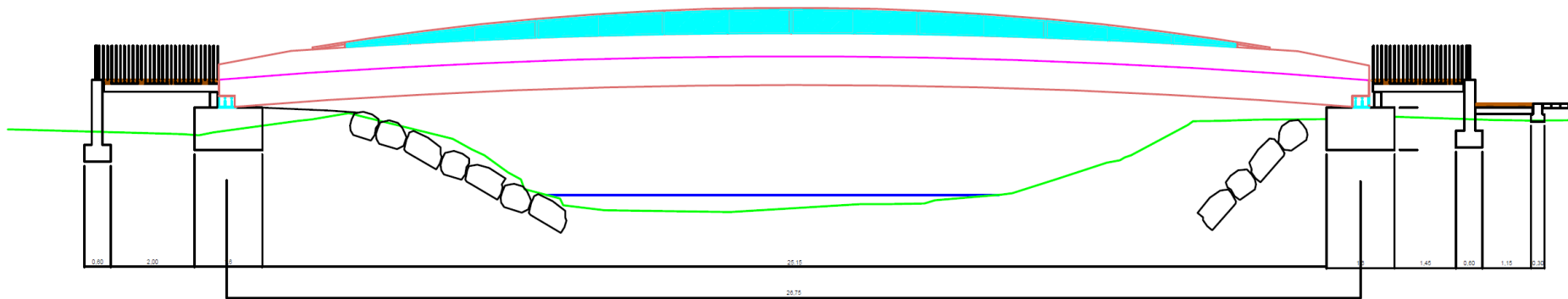


Figura 114. Detalle constructivo en alzado de pasarela ubicada en Villasuso de Cieza. Fuente: Yofra.



Figura 115. Imagen perspectiva in situ: de la pasarela ubicada en Villasuso de Cieza

En la **Figura 116** se pueden observar varios de los defectos presentes en la pasarela. Actualmente este paso se encuentra cerrado al tránsito por seguridad.



Figura 116. Detalles de defectos en pasarela ubicada en Villasuso de Cieza.

5.4.3 Ensayos ultrasónicos

En la **Figura 117** se observan los 5 puntos donde se realizaron los ensayos ultrasónicos sobre la pasarela. Estos puntos corresponden con los arranques del arco, en dirección paralela y perpendicular a los planos de encolado y un punto en la parte inferior de la plataforma en dirección paralela a los planos de encolado debido al deterioro presente en la zona. Se realizaron una media de 4 - 5 medidas en cada uno de los puntos, siendo cada una de estas el resultado de la media de 12 medidas internas realizadas por el aparato.

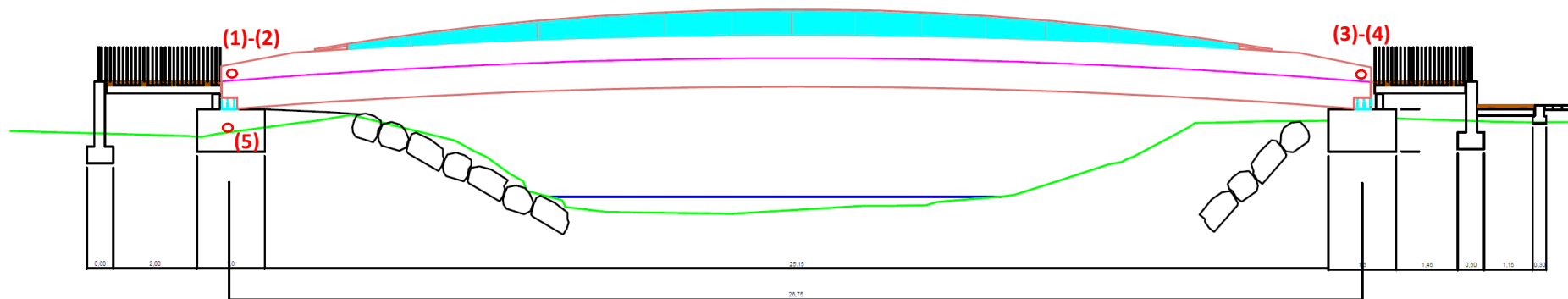


Figura 117. Ubicación de los puntos de ensayos ultrasónicos en vista en alzado de la pasarela ubicada en Villasuso de Cieza.

En la **Figura 118** se observa un instante captado durante la ejecución de los ensayos ultrasónicos en dos puntos de la pasarela ubicada en Villasuso de Cieza.



Figura 118. Detalle de ensayos ultrasónicos en pasarela en Villasuso de Cieza.

5.4.3.1 Resultados

La **Tabla 19** recoge los valores medios obtenidos de la medición en los puntos referidos en la **Figura 117**.

Tabla 19. Valores obtenidos en dirección paralela y perpendicular a los planos de encolado en pasarela ubicada en Villasuso de Cieza.

Punto	Longitud (cm)	Humedad (%)	Velocidad (m/s)
P1	19	*	1540,20
P1⊥	114	*	216,40
P2	19	*	1190,00
P2⊥	117	*	No existe acoplamiento
P3	18	*	1432,80
P3⊥	124	*	No existe acoplamiento
P4	18	*	1512,00
P4⊥	121	*	548,25
P5	19	*	1467,00

* Las humedades registradas fueron superiores al rango de correcta medición del xilohigrómetro (bastante superiores al punto de saturación de la fibra > 30%)

5.4.3.2 Interpretación y discusión de los datos

A la vista de los resultados recogidos en la **Tabla 19** se puede apreciar:

- Los valores obtenidos en dirección paralela a los planos de encolado resultan bastante concordantes en todos los puntos.
- Las velocidades de propagación ultrasónica en dirección perpendicular a los planos de encolado son muy inferiores a las obtenidas para cualquier clase resistente de pino estudiada previamente en laboratorio sobre madera nueva, no consiguiendo además acoplamiento en dos de los puntos medidos.

- Todos los puntos de la pasarela se pueden considerar con las fibras saturadas, debido a que los valores de humedad registrados por el xilohigrómetro son en todos los puntos superiores al 30%.
- Debido a la saturación de las fibras no se puede realizar una corrección al 12% de humedad para estandarizar los resultados.
- Sería necesario tener la clase resistente de la plataforma para poder realizar comparaciones con valores teóricos de especímenes sanos.

5.4.4 Ensayos Resistográficos

Al igual que en los casos anteriores, las lecturas se separan en 2 bloques según la orientación de la perforación respecto a los planos de encolado. Adicionalmente, en esta campaña de ensayos, se añade una nueva variable en las perforaciones paralelas. Se ha incluido una zona de perforación paralela adicional correspondiente a la zona baja de uno de los estribos, que se muestra en la **Figura 119**.

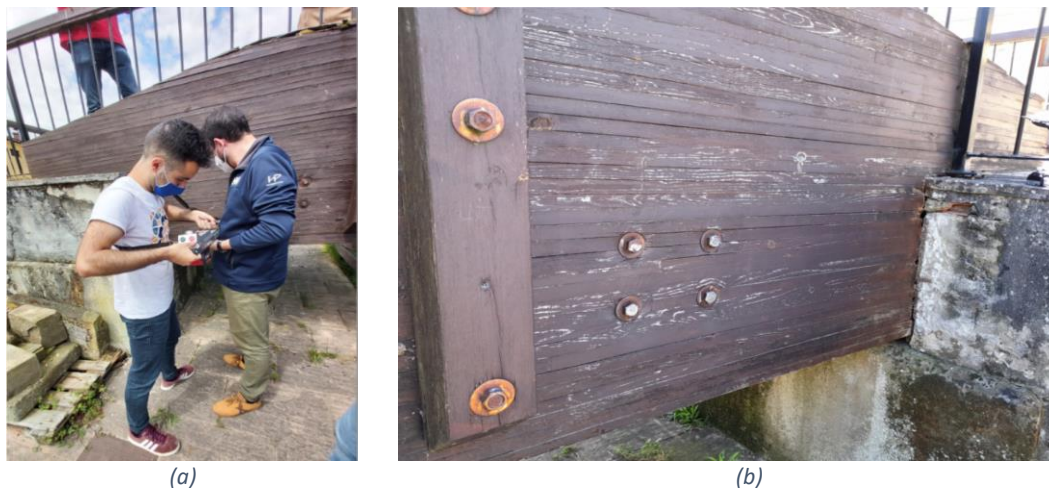


Figura 119. Zona ensayos paralelos al encolado 1'. a) Ejecución de la perforación Par/1'/1. b) Detalle de la zona correspondiente a la parte inferior del estribo.

Se incluye un croquis, **Figura 120**, indicando la ubicación de los ensayos resistográficos realizados en uno de los estribos, marcando en color rojo las perforaciones perpendiculares a los planos de encolado y en color azul las que se realizaron paralelas a los planos de encolado.

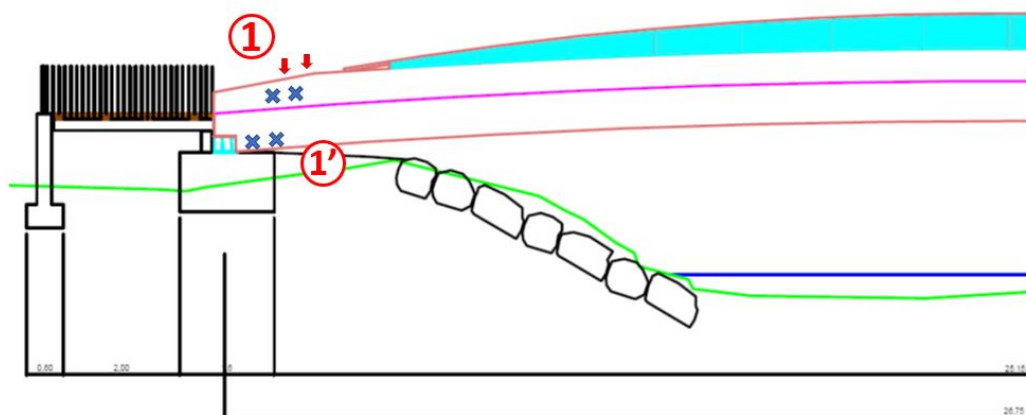


Figura 120. Ubicación de los ensayos en la pasarela de Villasuso de Cieza.

5.4.4.1 Resultados

En la **Tabla 20** se incluyen los datos obtenidos con los ensayos llevados a cabo en la pasarela.

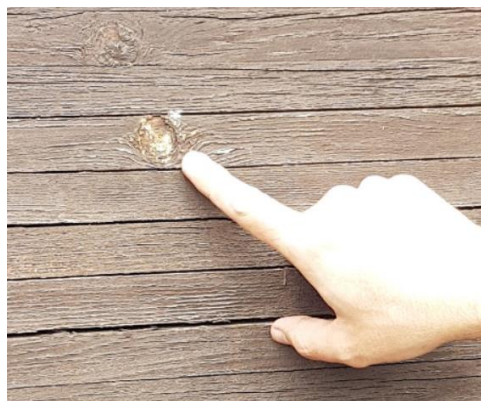
Tabla 20. Pasarela Villasuso de Cieza: Resultados resistográficos.

Dirección Perforación	Zona Pasarela	Posición	Resistografía (%)							
			Drill		Desviación Típica		Feed		Desviación Típica	
	1	1	23,21	23,36	2,47	3,67	11,08	11,51	3,18	2,57
		2	23,51		4,87		11,94		1,96	
	1'	1	20,29	20,10	3,91	3,89	11,93	12,05	2,82	2,98
		2	19,91		3,87		12,17		3,15	
	2	1	16,85	18,74	2,74	3,65	10,07	10,62	4,36	3,32
		2	20,63		4,55		11,16		2,28	
	3	1	22,11	21,71	3,84	2,73	12,92	12,13	3,66	2,69
		2	21,31		1,62		11,34		1,72	
	4		16,72	16,72	3,10	3,10	9,41	9,41	2,56	2,56
⊥	1	1	21,31	21,39	4,10	4,23	10,99	10,34	3,52	3,53
		2	21,46		4,37		9,69		3,54	
	2	1	18,47	19,49	2,57	3,34	8,74	9,01	3,35	3,35
		2	20,51		4,12		9,28		3,35	
	3	1	22,69	22,56	5,18	5,34	10,92	10,54	3,62	3,68
		2	22,43		5,50		10,16		3,74	

5.4.4.2 Puntos singulares

5.4.4.2.1 Perforación ||/1'/Nudo + Pudrición

Este punto de inspección fue elegido por la inclusión de un nudo en la lámina de madera, **Figura 121 a)** y también por la presencia de un hongo de pudrición por la zona posterior **Figura 121 b)**.



(a)



(b)

Figura 121. Ensayo Par/1'/Nudo + Pudrición. a) Nudo: Orificio de entrada. b) Pudrición: Orificio de salida.

En la gráfica resistográfica, **Figura 122**, se puede apreciar en la primera zona un gran incremento en los valores de amplitud resistográfica asociados al nudo y finalmente, el decaimiento de los valores podría asociarse al deterioro producido por el hongo de pudrición.

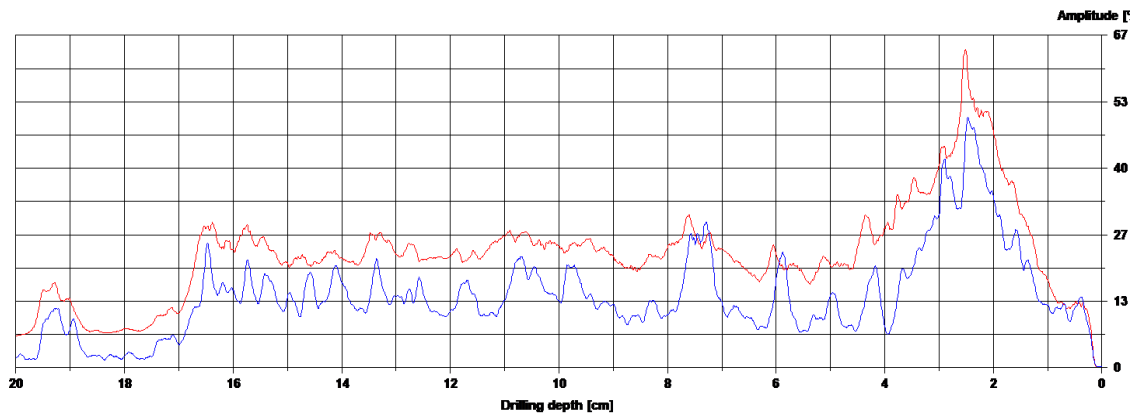


Figura 122. Gráfica resistográfica de la perforación //1'/Nudo + pudrición.

5.4.4.2.2 Perforación //1'/3

En la siguiente situación se observa que a lo largo de la perforación hay 2 zonas, a 3 y 15,7 cm, **Figura 123**, donde las curvas *drill* y *feed resistance* caen de forma crítica, pudiendo corresponder a zonas de cavidades internas.

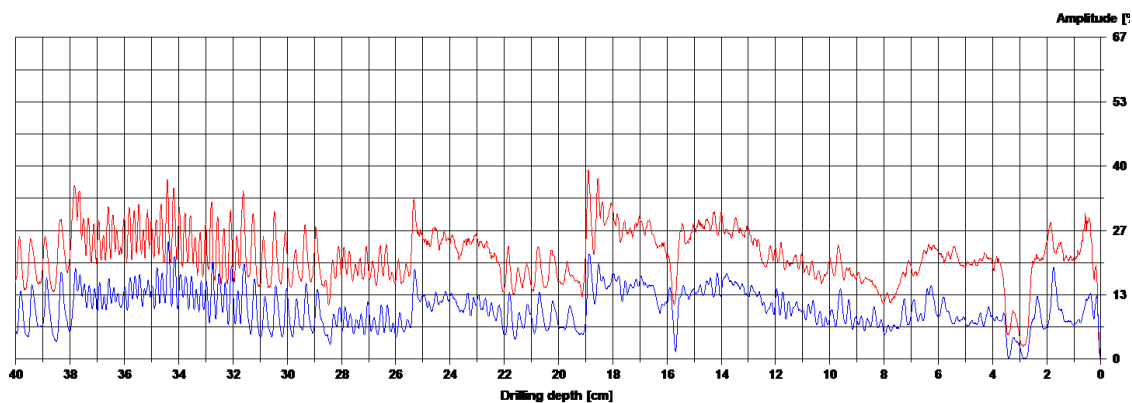


Figura 123. Gráfica resistográfica de la perforación //1'/3.

5.4.4.2.3 Perforaciones //3/Nudo 1 y //3/Nudo 2

Los dos ensayos siguientes corresponden a la misma zona en donde hay un nudo, ambas perforaciones, se han detenido por sobrecarga del equipo **Figura 124** **Figura 125**. En ambos casos se presenta un nudo superficial con un aumento de los valores resistográficos, pero la causa de la sobrecarga se presenta en la madera a 11 cm de profundidad, que podría deberse a la presencia de otro nudo.

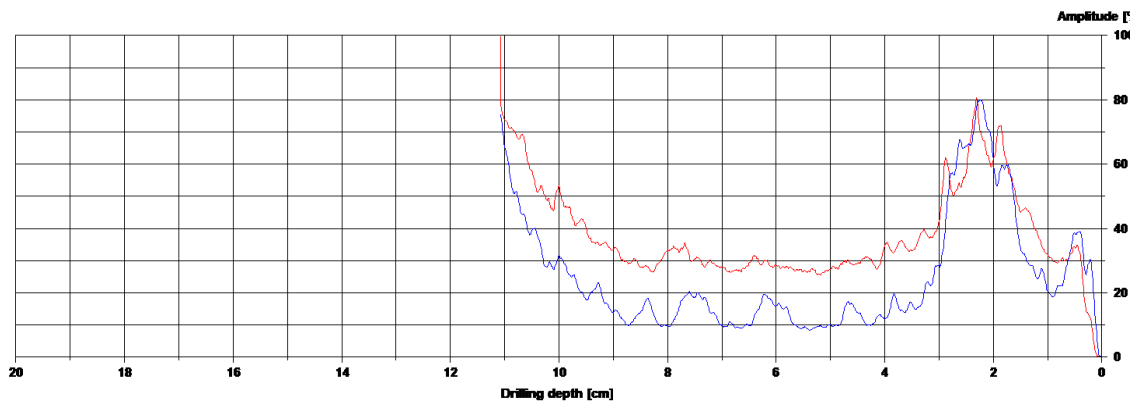


Figura 124. Gráfica resistográfica de la perforación //3/Nudo 1.

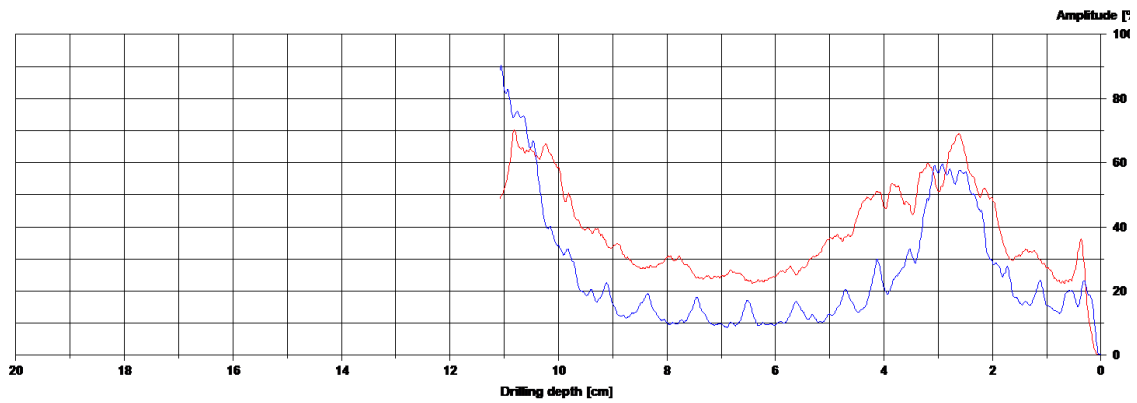


Figura 125. Gráfica resistográfica de la perforación //3/Nudo 2.

5.4.4.2.4 Perforación Rigidizador vertical

En este caso, la perforación se ha hecho en uno de los rigidizadores verticales de la pasarela que presenta un gran deterioro en la parte en contacto con la estructura portante de la estructura **Figura 126 a)**. En las **Figura 126 b) y c)**, se visualiza con más detalle el daño en la zona de los orificios de entrada y salida.



Figura 126. Ensayo en rigidizador vertical. a) Vista general. b) Orificio de entrada. c) Orificio de salida.

En la gráfica resistográfica, **Figura 127**, se puede observar que en la zona inspeccionada hay varias zonas donde directamente no hay madera debido a la degradación y la resistencia a la perforación es nula durante longitudes apreciables de la perforación (la anchura del elemento es de 12 cm, los 5 cm finales no están relacionados con la presencia de daño alguno).

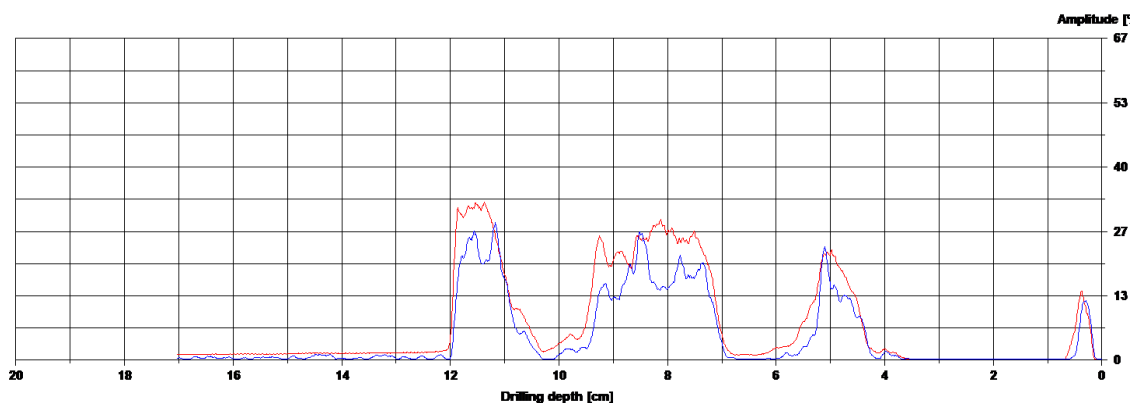




Figura 127. Gráfica resistográfica de la perforación en el rigidizador vertical.

Se incluyen en la siguiente **Tabla 21**, los valores medios de las amplitudes resistográficas referentes a *drill* y *feed resistance*, únicamente de las inspecciones de singularidades en las que el valor medio de amplitud resistográfica es representativo de los datos registrados puesto que, en otros casos debido a la divergencia de los datos, como la perforación de la **Figura 127** el promedio no da información relevante.

Con esta tabla, lo que se quiere mostrar es que la técnica del resistógrafo es útil para inspeccionar los valores medios de amplitudes resistográficas de un elemento de madera laminada, pero, a la vez, indicar que con este método ligeramente destructivo es también importante realizar una reflexión visual de la gráfica obtenida, puesto que obtener valores que entran dentro del rango de datos normales de los ensayos efectuados en la estructura, no significa que la zona ensayada esté libre de imperfecciones como las que se han expuesto en este apartado.

Tabla 21. Singularidades: Valores promedio de amplitud resistográfica y desviación típica.

Resistografía (%)				
Perforación	Drill	Desviación Típica	Feed	Desviación Típica
/1'/Nudo + pudrición	23,18	9,45	13,52	3,81
/1'/3	21,14	5,43	10,44	3,66



Capítulo 6

Concusiones

6.1 Estado del arte

6.2 Campaña ensayos en

6.3 Campaña ensayos in situ

6 Conclusiones

6.1 Estado del arte

- Existe una discordancia con la información de los estudios mencionados en el apartado “*Propagación de ondas ultrasónicas*”. Se observa que, en literatura, el valor del **coeficiente de correlación entre velocidad ultrasónica y densidad para madera aserrada** es de $R^2 = 0,8$. Con la campaña de **ensayos en laboratorio sobre elementos de madera laminada encolada** se han conseguido, en el mejor de los casos, separando los datos en las diferentes especies leñosas, coeficientes de Pearson de $R^2 = 0,3335; 0,5133; 0,8299$ para el pino tanalizado, abeto y pino silvestre, respectivamente.
- Esto indica que, a pesar de tratarse de madera, el **formato de producto es importante**, puesto que el proceso de fabricación es diferente y en el caso del glulam, además de estar compuesto por elementos de madera aserrada, existen interfases de adhesivo que obligan a estudiar en una **línea de investigación propia, el funcionamiento de los ensayos ultrasónicos**.
- Respecto a los ensayos **resistográficos**, en el apartado “2.7.5.5 Resistografía”, los trabajos previos revisados aluden a **coeficientes de correlación** entre la **amplitud resistográfica y la densidad** de la madera, para **madera aserrada**, de rangos muy dispares según el estudio del que provienen. Los más precisos indican un $R^2 = 0,9429$, mientras que los más conservadores consiguen valores de $0,55 < R^2 < 0,85$. Con el presente trabajo, en la **campaña experimental de laboratorio con madera laminada encolada**, se han conseguido, en el mejor de los casos, separando los datos en las diferentes especies leñosas, coeficientes de Pearson de $R^2 = 0,5443; 0,2529; 0,9165$ para el pino tanalizado, abeto y pino silvestre, respectivamente.

6.2 Campaña ensayos en laboratorio

6.2.1 Humedad mediante xilohigrómetro

- El **xilohigrómetro** es un método **rápido y sencillo** para determinar la humedad de la madera. No obstante, para madera laminada encolada, puede afirmarse que, debido a que los elementos constructivos resultan de la adhesión de varias láminas de madera aserrada, **no se debe extrapolar el valor local obtenido con el equipo para todo el elemento**, puesto que el comportamiento higroscópico de cada lámina es distinto.
- El xilohigrómetro introduce un **error cada vez más elevado cuanto mayor es la humedad que registra**. En algunos casos los errores rondan el 5% en términos absolutos de humedad. El fabricante indica que el instrumento tiene **fiabilidad** en las medidas **hasta el punto de saturación de las fibras (30%)**.
- En definitiva, puede concluirse que la xilohigrometría en madera laminada encolada es un **método sencillo**, pero hasta cierto punto inexacto, proporcionando **valores de humedad orientativos**.

6.2.2 Resistografía - Densidad

- Para conseguir una **mejor correlación de la densidad con los datos de amplitud resistográfica** deben ejecutarse **varias perforaciones en un mismo elemento** y con estos hallar un promedio de la media de amplitud. Gracias a este proceso se evitan valores extremos asociados a láminas especialmente densas o con muchas singularidades.
- A la hora de formular conclusiones sobre la correlación entre la amplitud resistográfica y la densidad de la madera laminada, el **cálculo cuantitativo** debe realizarse con los

datos de **resistencia a la perforación** (drill resistance) y no con los de la **resistencia al avance** (feed resistance), puesto que estos últimos nos ayudan de forma cualitativa a identificar cavidades y otras singularidades, como se explica en el apartado “3.2.4 Resistografía”.

- A priori, con la muestra de 50 probetas ensayadas, se ha percibido una **mejor correlación entre la densidad y la amplitud resistográfica procediendo a realizar el análisis de forma separada por especies leñosas**. Sin embargo, **se considera necesario hacer un estudio con una muestra todavía más amplia de probetas**. De forma global, se ha obtenido un $R^2 = 0,3009$, mientras que separando en las diferentes especies se obtienen valores de $R^2 = 0,5443$; $0,2529$; $0,9165$ para el pino tanalizado, abeto y pino silvestre, respectivamente.

6.2.3 Velocidad de propagación de ultrasonidos - Densidad

- En el caso de la correlación de datos de **velocidad de ultrasonidos en dirección transversal a los planos de encolado** con la **densidad**, globalmente se ha obtenido un valor de $R^2 = 0,3848$, que, en general, se mejora al **realizar el análisis por especies** obteniendo $R^2 = 0,3335$; $0,5133$; $0,8299$ para el pino tanalizado, abeto y pino silvestre, respectivamente.
- Cabe mencionar que el último valor perteneciente a pino silvestre cabe no considerarlo como significativo a la luz del comportamiento excepcional mostrado por las rebanadas de la viga 69 (pino silvestre GL18).
- No se ha encontrado una explicación razonable de por qué, para la probeta 69 (pino silvestre GL18), se obtienen mayores velocidades de propagación de ondas ultrasónicas siendo menor la densidad que para el caso del pino silvestre GL24, máxime considerando que, según Yofra S.A., para la fabricación de las GL18 partieron de madera C24 de los laterales de los troncos, descartada por clasificación visual para fabricar las GL24 por tener más discontinuidades, preferentemente nudos, y, por tanto, debiera de haberse obtenido menos velocidad de propagación. En conclusión, **se propone realizar un estudio más exhaustivo en esta especie, y sobre todo para la clase resistente GL18, para arrojar claridad al estudio con una muestra más amplia**.

6.2.4 Resistografía - Velocidad de propagación de ultrasonidos

- Para esta correlación, se observa que dejando de lado el caso particular referido de la probeta 69⁴², se obtiene una **correlación entre los dos métodos de inspección** bastante bueno para un material tan heterogéneo, teniendo un R^2 para **Drill resistance-US transversal de 0,4408**.
- En comparación, tomando en cuenta los valores de la probeta 69 el valor de R^2 desciende a $0,0257$. Debiendo realizar un **estudio más exhaustivo para el pino silvestre**, y sobre todo para la clase resistente **GL18**, para obtener valores de R^2 mayores, del orden de los mencionados en el anterior punto.
- Debido a la interesante relación verificada entre ambos ensayos y, al mismo tiempo, la correlación que tienen ambos con la densidad de la madera, se propone el **uso de campañas conjuntas de ultrasonidos y resistografía**, para aproximar el **valor de la densidad de la madera laminada en inspecciones in situ**.

⁴² Esta probeta, con una densidad media, arrojó el mejor comportamiento de todas las ensayadas en términos de velocidad de propagación transversal al encolado y, al mismo tiempo, la menor resistencia a la perforación (atravesando igualmente los planos de encolado).



6.2.5 Resistografía - Humedad estufa

- De acuerdo al hecho de no haber encontrado, en la fase de investigación, ningún parámetro de corrección para la resistografía, en la práctica **no se ha observado influencia del contenido de humedad en las lecturas de amplitud resistográfica de la madera**, al menos en los rangos de humedad experimentados. Concluyendo en que no es una variable que altere las lecturas resistográficas de los ensayos.

6.2.6 Velocidad de propagación de ultrasonidos - Humedad estufa

- En los ensayos de ultrasonidos realizados con probetas con un contenido de humedad en torno al 12%, **no se dispone de una variación suficientemente grande de la humedad** interna de la madera, **para observar** claramente el **descenso de la velocidad ultrasónica** con la subida del contenido de humedad que se sugiere en bibliografía.

6.3 Campaña ensayos in situ

6.3.1 Relativas a los ensayos ultrasónicos

6.3.1.1 Pasarela de Las Fraguas

- En la pasarela de Las Fraguas, construida con **glulam de pino tanalizado GL28**, el promedio de la **velocidad de propagación**, corregida al 12% de humedad, en **dirección paralela** a los planos de encolado fue de **1681 m/s**. Mientras que la velocidad para esa misma especie de madera y clase resistente medida **en laboratorio** sobre elementos **sin deterioro** es de **1677,07 m/s**. Lo cual supone un incremento del **0,2%**, siendo **prácticamente idéntica**.
- En la misma pasarela, el promedio de la velocidad de propagación, corregida al 12% de humedad, en **dirección perpendicular** a los planos de encolado fue de **1118 m/s**. Mientras que la velocidad para esa misma especie de madera y clase resistente medida **en laboratorio** sobre elementos **sin deterioro** es de **1365,92 m/s**. Lo cual supone una **baja del 18,2%**.
- De esta pasarela podemos decir que, tras un año en servicio, los **datos ultrasónicos en paralelo sugieren un estado muy bueno** de conservación de la estructura, mientras que la información de las mediciones **perpendiculares a los planos de encolado indica una merma de los valores ultrasónicos y, por ende, una disminución de la densidad inicial** de la madera de pino tanalizado GL28. Cabe mencionar que sería necesario una inspección más en detalle de este último caso, puesto que, como se refiere en el apartado “5.2.3.1 Resultados US Pasarela de Las Fraguas”, se presentaron algunas dificultades para realizar los ensayos en esta dirección de ensayo.

6.3.1.2 Pasarela de Nueva Montaña

- En la realización de ensayos en **medida indirecta** en **distancias entre transductores superiores a 1 metro**, la **frecuencia** empleada por el equipo parece mostrarse demasiado elevada, **atenuándose** en su tránsito dentro de la estructura y, por ende, arrojando **errores en las medidas** con la consecuente incertidumbre.
- Los **pernos roscados** existentes en las vigas de las pasarelas **provocan error** en las medidas, debido a la reflexión de las ondas en ellos.

6.3.1.3 Pasarela de Villasuso de Cieza

- Cualquier punto con un valor de **humedad igual o superior al 30%** (medida según xilohigrómetro) puede considerarse con las **fibras saturadas** y **no es posible** realizar una **corrección** de los valores ultrasónicos a valores normalizados de humedad del **12%**.

6.3.1.4 General

- Debido a la **gran sensibilidad** que poseen los transductores, cualquier **ruido ambiental o vibraciones en la estructura** perturba las medidas, siendo necesario repetir los ensayos múltiples ocasiones para obtener lecturas no erróneas.
- En los ensayos in situ se han experimentado **desviaciones en las mediciones de la velocidad de propagación, respecto al valor teórico de laboratorio**. Puesto que las **condiciones in situ** no están tan **normalizadas** como en laboratorio, a la hora de hacer una comparativa de las desviaciones obtenidas, se ha considerado que **desviaciones inferiores al 10% son posibles de conseguir** y suponen una **aproximación bastante aceptable**.

6.3.2 Relativas a los ensayos resistográficos

6.3.2.1 Comparativa de resultados en las 3 pasarelas

La **Tabla 22** muestra información sobre los promedios de amplitud resistográfica de todas las perforaciones realizadas en cada pasarela, separadas por *drill y feed resistance* y según la dirección paralela y perpendicular a los planos de encolado. Además del promedio, se añade la dispersión obtenida del conjunto de promedios de amplitud resistográfica de cada perforación ejecutada respecto al promedio indicado.

Esta tabla ofrece los resultados de una forma simplificada, para una rápida interpretación y comparación entre las diferentes estructuras objeto de ensayo.

Tabla 22. Promedio de amplitudes resistográficas y su dispersión respecto al total de perforaciones en cada pasarela estudiada.

	Pasarela	Antigüedad	Drill (%)		Feed (%)	
			Promedio	Dispersión	Promedio	Dispersión
Paralela	Las Fraguas	1 año	22,59	1,63	14,01	1,26
	Nueva montaña	10 años	25,82	5,95	15,01	1,47
	Villasuso de Cieza	20 años	20,13	2,30	11,14	1,02
Perpendicular	Las Fraguas	1 año	26,26	2,57	15,61	1,64
	Nueva montaña	10 años	23,34	1,54	13,71	3,07
	Villasuso de Cieza	20 años	21,14	1,27	9,96	0,68

- A medida que la **antigüedad de la estructura es mayor**, las **amplitudes resistográficas en perpendicular son menores**, mientras que, **en paralelo**, esta condición **no se cumple** entre las **pasarelas de Las Fraguas y Villasuso de Cieza**.

Haciendo la comparación con la pasarela de **Villasuso de Cieza**, en todas las tipologías de ensayos (orientación paralela y perpendicular, curvas drill y feed), se han experimentado **valores más reducidos** que en el caso de Las Fraguas y Nueva Montaña, siendo notable el estado y **deterioro de la madera** que constituye la estructura más antigua.

Sin embargo, entre las pasarelas de **1 y 10 años** los valores resistográficos, en dirección paralela a los planos de encolado, **no guardan esta relación**. Porque, aunque según los valores de ambas estructuras indican un **buen estado de la madera**, el material empleado para su construcción es diferente (GL28 vs. GL24). Además, cabe mencionar, que con el paso del tiempo las **interfases encoladas se deterioran** y, por tanto, en la



perforación perpendicular, la merma de la amplitud **es más notoria que en sentido paralelo**.

6.3.2.2 Resistógrafo como herramienta de inspección visual y tratamiento de datos cuantitativos

Por otro lado, como se mencionó en el apartado “4.4.2 Puntos singulares”, se ha comprobado la **doble utilidad del resistógrafo**:

- Como instrumento con el que se puede hacer un tratamiento de los datos de forma **cuantitativa**, observando los **valores de amplitudes resistográficas** medias de la madera ensayada.
- Como instrumento que obtiene un **perfil resistográfico**, el cual puede ser inspeccionado observando las irregularidades a lo largo de la perforación para determinar **cualitativamente** la **existencia de singularidades** como nudos, cavidades, fendas, acebolladuras, bolsas de resina, etc.

6.3.2.3 Comparativa de los valores resistográficos de los ensayos realizados en las láminas más superficiales y en las intermedias en Nueva Montaña

Como se comentó al inicio, en la pasarela de Nueva Montaña, se decidió realizar ensayos en sentido paralelo a los encolados en dos zonas diferentes en cada parte de la estructura. Una fue en la lámina superior y con mayor superficie expuesta a la intemperie y otra, en una lámina más interna y, por tanto, más protegida del ambiente.

Lo que muestran los datos obtenidos de los ensayos resistográficos, **Tabla 23**, es una tendencia justo al contrario de lo supuesto. Tanto para *drill resistance*, como para *feed resistance*, los valores de las perforaciones en la lámina superior son mayores que los de la lámina intermedia, salvo para los valores de *Feed resistance* en la Zona 4.

Esto indica que, aunque la apariencia exterior de la lámina superior sea peor, **el deterioro** se ha mantenido en las capas milimétricas más superficiales, **no alterando el estado del interior de los elementos**.

Tabla 23. Nueva Montaña, dirección paralela a los planos de encolado: Resultados resistográficos.

Dirección perforación	Zona pasarela	Posición	N.º	Resistografía							
				Drill		Desviación típica		Feed		Desviación típica	
II	1	Sup	1	27,2	25,31	3,05	2,84	16,8	15,59	5,68	5,04
			2	23,41		2,63		14,38		4,39	
		Med	1	20,93	21,14	3,59	5,05	13,32	13,53	2,82	2,88
			2	21,36		6,5		13,74		2,95	
	3	Sup	1	34,84	24,71	8,06	5,47	15,48	16,09	1,8	4,40
			1'	20,6		5,29		16,05		5,22	
			2	18,7		3,04		16,76		6,19	
		Med	1	18,63	17,11	3,57	2,77	16,15	15,20	3,63	2,96
			2	15,6		1,98		14,26		2,3	
	4	Sup	1	22,36	34,03	2,77	11,29	13,49	12,67	4,95	4,44
			2	34,03		11,29		11,84		3,92	
		Med	1	42,97	32,60	11,67	8,74	16,43	16,96	2,5	4,43
			2	27,2		3,05		16,8		5,68	



Capítulo 7

Propuestas de mejora y trabajos futuros

7.1 Ensayos de laboratorio

7.2 Ensayos in situ



7 Propuestas de mejora y trabajos futuros

Tras la elaboración de este trabajo y la realización de numerosos ensayos en laboratorio y en las estructuras de madera, se han presentado algunas complejidades, ya sea en la parte de la ejecución de ensayos in situ o en campo, o en el procesado y análisis de los datos.

Este capítulo tiene como fin hacer un comentario sobre las mejoras y posibles tareas futuras que se podrían realizar, con el objetivo de indagar más en la temática tratada en este documento.

Ensayos de laboratorio

Respecto a los **ensayos sobre elementos sanos** de madera laminada encolada, es conveniente proseguir con la investigación sobre las metodologías de **propagación de ultrasonidos y resistografía, ampliando la muestra** de probetas de las especies y clasificaciones resistentes ensayadas. De esta manera, se formará una **base de datos de referencia** de valores ultrasónicos y de amplitudes resistográficas, para dichos elementos de madera clasificados. Por la misma razón, es interesante realizar **más campañas** de ensayos, aplicando la misma metodología, para **otras especies y clasificaciones resistentes**.

Por otra parte, es importante **seguir investigando**, en particular sobre la especie de madera de **pino silvestre GL18** (Probeta 69), conformada a partir de madera C24 del lateral de los troncos, puesto que los datos obtenidos en los **ensayos de ultrasonidos** no son nada concluyentes, como se mencionó en el apartado “6.2.3 Velocidad de propagación de ultrasonidos - Densidad”.

Adicionalmente, es interesante el **estudio** con los equipos de US y resistografía de **elementos deteriorados**. Ya sea **mecánicamente** simulando los desperfectos causados en el ciclo de vida de un elemento, pero también, empleando elementos que han sido almacenados en **condiciones favorables para la proliferación de agentes destructores bióticos de la madera** (termitas, carcoma, hongos de pudrición, etc.), alcancen un grado notable de deterioro. De este forma se pueden hacer ensayos sobre elementos que se conoce previamente el estado interno de degradación y se podrá entender con mayor detalle los valores obtenidos por las diferentes metodologías.

7.1 Ensayos in situ

Se considera necesario realizar una **nueva campaña** de ensayos de velocidad de **propagación ultrasónica en medición indirecta** en la pasarela de **Nueva Montaña**. Esta vez realizando los ensayos únicamente entre los pernos de la estructura, para no inducir a errores debido a la interferencia de estos elementos metálicos.

Además, se recomienda repetir esta campaña de ensayos en “**épocas secas**” en Santander, puesto que el **contenido de humedad registrada** en la estructura por medio de xilohigrometría manifestó, con frecuencia, valores de **más del 30%**, lo que sobrepasa el rango de medición para el que el fabricante garantiza la precisión del equipo. Esto conlleva, a que las lecturas ultrasónicas realizadas no puedan **corregirse a valores de humedad normalizados del 12%**.

Debido a la **problemática de acople** en algunos de los **ensayos ultrasónicos** en la pasarela de **Las Fraguas**, con la repetición de ensayos en **dirección perpendicular**, se podrán obtener conclusiones más claras sobre la información obtenida.

Por último, se propone llevar a cabo una metodología **más precisa de comparación de los datos en estructuras con diferentes tiempos en servicio**, ya que en este trabajo se han comparado estructuras de 1, 10 y 20 años, en las que varían ciertos matices, como las condiciones ambientales, la clasificación resistente, especie de madera e incluso las tareas de conservación



de las estructuras durante su tiempo en funcionamiento. Para realizar esta comparación de la forma más rigurosa, se propone **repetir los mismos ensayos que se han ejecutado en la campaña experimental in situ, pasados unos años.**



Bibliografía



Bibliografía

- [1] J. Galván, R. Carabaño, I. Oteiza, and M. E., “Madera contralaminada (CLT), situación actual. Alternativa para una construcción sostenible en España,” in *I Congreso Internacional sobre investigación en Construcción y Tecnología Arquitectónicas. Universidad Politécnica de Madrid. ETSAM.*, 2014, pp. 1–5, Accessed: Jun. 01, 2021. [Online]. Available: http://oa.upm.es/32534/1/INVE_MEM_2014_174225.pdf.
- [2] “Decadencia y recuperación de la madera estructural.” <https://maderayconstruccion.com/decadencia-y-recuperacion-de-la-madera-estructural/> (accessed May 22, 2021).
- [3] M. Puy Galarza, “Aplicación de la teoría Zig-Zag Refinada para el análisis de vigas Laminadas de Madera.” Tesis de Máster. Universidad de Barcelona, 2015.
- [4] M. De Fomento, *CTE: DB SE-M. Documento Básico Seguridad Estructural - Madera*. 2019.
- [5] A. Basterra Otero, M. Casado Sanz, L. Acuña Rello, and O. Pinazo, “Técnicas de ensayo pseudo no destructivas en madera estructural mediante extracción de tornillos,” *Rev. electrónica ReCoPaR*, no. 2, pp. 37–59, 2006.
- [6] V. R. García-Ortiz *et al.*, “Principales preservadores maderables y exudados microbianos con actividad antagonista al desarrollo en agentes biológicos deletéreos,” *Rev. Mex. Fitopatol. Mex. J. Phytopathol.*, vol. 36, no. 1, pp. 56–78, Nov. 2017, doi: 10.18781/R.MEX.FIT.1704-2.
- [7] I. Lombillo Vozmediano, “Apuntes didácticos G1183 – Patología y Rehabilitación de la Edificación.”
- [8] Interempresas.net, “Madera aserrada para uso estructural,” 2013. <https://www.interempresas.net/Madera/Articulos/105399-Madera-aserrada-para-uso-estructural.html> (accessed Jun. 01, 2021).
- [9] L. A. Basterra, L. Acuña, M. Casado, G. Ramón-Cueto, and G. López, “Diagnosis and assessment of timber structures using nondestructive techniques: application to the Plaza Mayor in Chinchón (Madrid) | Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: aplicación a la Plaza Mayor de Chinchón,” *Inf. la Constr.*, vol. 61, no. 516, pp. 21–36, 2009, doi: 10.3989/ic.09.016.
- [10] AENOR, *UNE EN 41805 Parte 8. Diagnóstico de Edificios. Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera.pdf*. 2009.
- [11] J. Valero Camacho, “Evaluación no destructiva de madera antigua y patrimonial usada estructuralmente.” Trabajo Fin de Grado. Universitat Politècnica de València, 2017.
- [12] P. Urbán Brotons, *Construcción de estructuras de madera*, 1st ed. San Vicente (Alicante): Editorial club universitario, 2012.
- [13] M. G. Sanz, “Estudio sobre el estado de conservación de la cubierta del Martinete de Navafría.” Trabajo Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Madrid, 2012, [Online]. Available: <http://oa.upm.es/36345/>.
- [14] AENOR, *UNE EN 56546: Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas*. 2013.
- [15] Aitim and Consejo superior de los colegios de arquitectura de España, “Productos de madera para la arquitectura.” p. 371, 2005.



- [16] Maderea.es, “Productos técnicos de madera para construcción,” 2020. <https://www.maderea.es/productos-tecnicos-de-madera-para-construccion/> (accessed Jun. 01, 2021).
- [17] G. N. Brekke, M. Hanisch, K. B. Schule, G. Alem, C. Hannisch, and E. A. Stubenrauch, “Madera laminada encolada,” pp. 322–332, 1980.
- [18] J. I. Fernández Lobo, “Proyecto de pasarela en La Valeta (Malta).” Trabajo Fin de Máster. Universidad de Cantabria, 2015.
- [19] L. García Esteban and RTVE, “Documentales Madera laminada.” http://www.tecnologiadelamadera.es/Tecnologia_de_la_madera/Documentales_2.html (accessed Jan. 16, 2021).
- [20] AENOR, “UNE EN 14080: Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos,” 2017.
- [21] E. Hermoso, R. Mateo, J. C. Cabrero, and J. I. Fernández-Golfín, “Evaluation and analysis of structural properties of wood products | Evaluación y análisis de propiedades estructurales de productos de madera,” *Inf. la Constr.*, vol. 67, no. 537, 2015, doi: 10.3989/ic.13.061.
- [22] “Inconvenientes de la madera laminada encolada.” <https://www.maderea.es/madera-laminada/>.
- [23] R. Sevilla Allende, “La madera laminada y su aplicación en la arquitectura.” Trabajo Fin de Grado. Universidad Politécnica de Madrid, 2018, [Online]. Available: <https://www.archdaily.co/co/767512/materiales-madera-laminada-y-su-aplicacion-en-la-arquitectura>.
- [24] AENOR, *UNE EN 1912: Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies*. 2012.
- [25] AENOR, *UNE EN 56544: Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*. 2011.
- [26] AENOR, *UNE EN 338: Madera estructural. Clases resistentes*. 2017.
- [27] S. Valencia Manzo and J. Vargas Hernández, “Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera,” *Madera y Bosques*, vol. 3, no. 1, pp. 81–87, 2016, doi: 10.21829/myb.1997.311381.
- [28] D. F. Llana, G. Íñiguez-González, M. R. Díez, and F. Arriaga, “Nondestructive testing used on timber in Spain: A literature review,” *Maderas Cienc. y Tecnol.*, vol. 22, no. 2, pp. 133–156, 2020, doi: 10.4067/S0718-221X2020005000201.
- [29] T. Blanco del Río, “Evaluación de la degradación de la madera por humectación. Empleo de END por inspección visual y US.” Trabajo Fin de Máster. Universidad de Cantabria, 2015.
- [30] C. Ceraldi, V. Mormone, and E. Russo Ermolli, “Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 34, no. 1, pp. 59–64, 2001, doi: 10.1007/bf02482201.
- [31] I. Rodríguez Abad, “Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera.” Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2009.



- [32] Y. Chen and W. Guo, "Nondestructive evaluation and reliability analysis for determining the mechanical properties of old wood of ancient timber structure," *BioResources*, vol. 12, no. 2, pp. 2310–2325, 2017, doi: 10.15376/biores.12.2.2310-2325.
- [33] G. Íñiguez González, F. Arriaga Martitegui, M. E. Herrero, and R. Argüelles Álvarez, "Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural | Vibration methods as non-destructive tool for structural properties assessment of sawn timber," 2007.
- [34] R. Baettig, P. Perré, and R. Rémond, "Aplicación de espectrometría de rayos x para el estudio de la madera: Algunos resultados iniciales," *Maderas: Ciencia y Tecnología*, vol. 9, no. 3. Universidad del Bío-Bío, pp. 271–283, 2007, doi: 10.4067/s0718-221x2007000300007.
- [35] D. Ahicart Safont, "Análisis de esculturas de madera con Tomografía Computarizada. Uso de la Tomografía de Doble Energía. Protocolos y aplicaciones," p. 222, 2016, [Online]. Available: <http://dspace.ceu.es/handle/10637/8578>.
- [36] G. Íñiguez González, "Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural." Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2007.
- [37] D. F. Llana, G. Íñiguez-González, J. Montón, and F. Arriaga, "In-situ density estimation by four nondestructive techniques on Norway spruce from built-in wood structures," *Holzforschung*, vol. 72, no. 10, pp. 871–879, 2018, doi: 10.1515/hf-2018-0027.
- [38] I. Bobadilla, R. D. Martínez, M. Esteban, and D. F. Llana, "Estimation of wood density by the core drilling technique," *Holzforschung*, vol. 72, no. 12, pp. 1051–1056, 2018, doi: 10.1515/hf-2018-0036.
- [39] L. Palaia, "Empleo del penetrómetro para madera para el diagnóstico de la madera en servicio en edificios antiguos," *Inf. la Construcción*, 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.12.055>.
- [40] I. Fundova, T. Funda, and H. X. Wu, "Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Resistograph and Pilodyn," *PLoS One*, vol. 13, no. 9, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0204518.
- [41] F. Rinn, "Resistographic visualization of tree-ring density variations," *Int. Conf. tree rings, Environ. Humanit.*, p. 4, 1994, Accessed: Jun. 02, 2021. [Online]. Available: http://download.rinntech.com/RINN_ResistographicVisualizationOfTreeRingStructures_RADIOCARBON_1996.pdf.
- [42] F. Rinn, "Basics of typical resistance-drilling profiles," *West. Arborist*, no. Winter, pp. 30–36, 2012, [Online]. Available: http://www.download.rinntech.com/Rinn_BasicsOfResistanceDrilling_WCISAWinter2012.pdf.
- [43] I. Soto Martínez, "Estudio de la relación entre perfiles de densidad y gráficas resistográficas en madera estructural y aplicaciones industriales." Trabajo Fin de Carrera. Universitat Politècnica de València, 2010.
- [44] AENOR, *UNE EN 384: Madera estructural determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. 2020.
- [45] AENOR, *UNE EN 408: Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. 2019.



-
- [46] AENOR, *UNE EN 13183-1: Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Determinación por el método de secado en estufa*. 2019.
- [47] AENOR, *UNE EN 13183-2: Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Estimación por el método de la resistencia eléctrica*. 2002.
- [48] J. L. Sandoz, "Grading of construction timber by ultrasound," *Wood Sci. Technol.*, vol. 23, no. 1, pp. 95–108, Feb. 1989, doi: 10.1007/BF00350611.



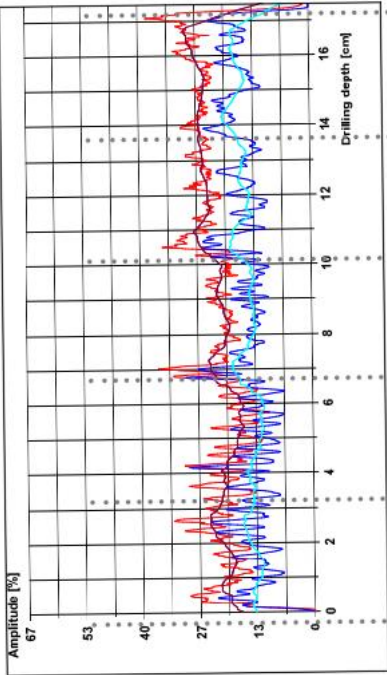
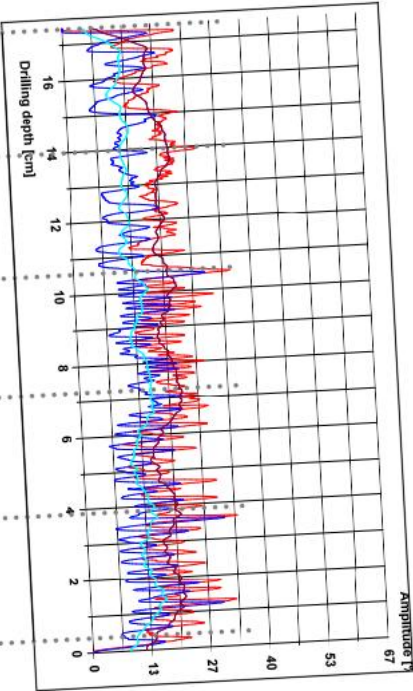


Anexo 1



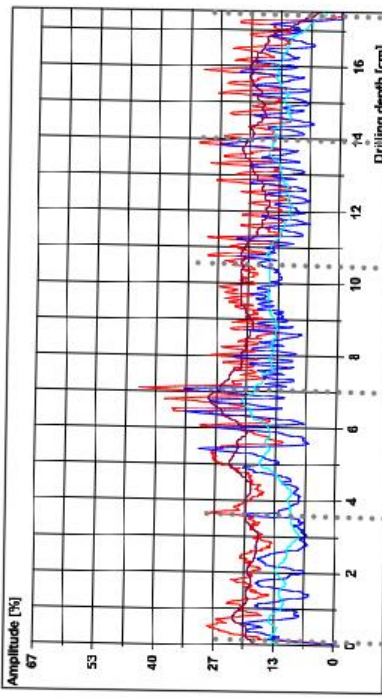
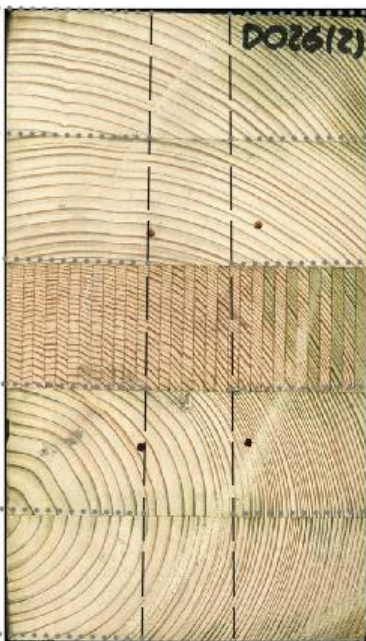
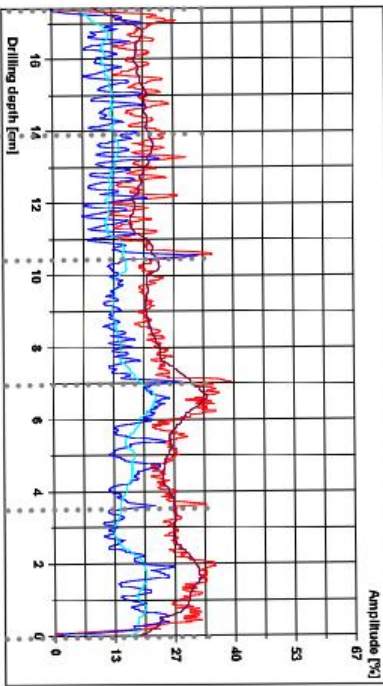
Fichas técnicas



Anexo 1: Fichas técnicas

Especie			Nomenclatura		
Pino tanalizado			D026 (1)		
Clase resistente					
GL24					
Densidad (g/cm ³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,449					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
172,08		98,81		29,79	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)					
Fecha		Peso acondicionado (g)		Humedad (%) Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2) 14,4	
23/03/2021		229,7			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					
Fecha		Peso seco (g)		Secado en estufa (UNE-EN 13183-1) 13,8	
24/03/2021		201,76			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1744	0,0	2091	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021	 Resist. taladrado	 Resist. al avance		
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>Perf. 1</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Perf. 2</p>  </div> </div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,75	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	19,44
	sd_{drill} (%)	4,67		sd_{drill} (%)	4,61
17,23	\bar{X}_{feed} (%)	15,39	17,32	\bar{X}_{feed} (%)	13,21
	sd_{feed} (%)	4,13		sd_{feed} (%)	4,62
Observaciones					



Especie			Nomenclatura		
Pino tanalizado			D026 (2)		
Clase resistente					
GL24					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,462					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
171,92		99,05		31,88	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			16,3
23/03/2021		253,1			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)		13,7	
24/03/2021		222,59			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1852	0,0	2165	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
Perf. 2 Perf. 1					
					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,77	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	19,92
	sd_{drill} (%)	5,26		sd_{drill} (%)	4,84
17,28	\bar{X}_{feed} (%)	14,71	17,27	\bar{X}_{feed} (%)	13,46
	sd_{feed} (%)	2,19		sd_{feed} (%)	4,94



Observaciones



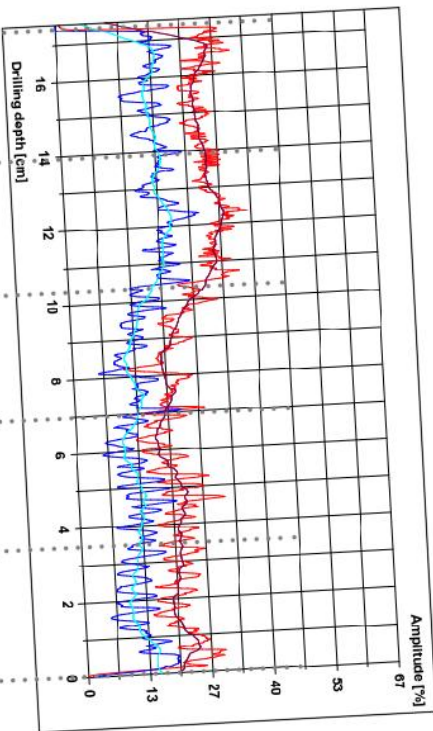
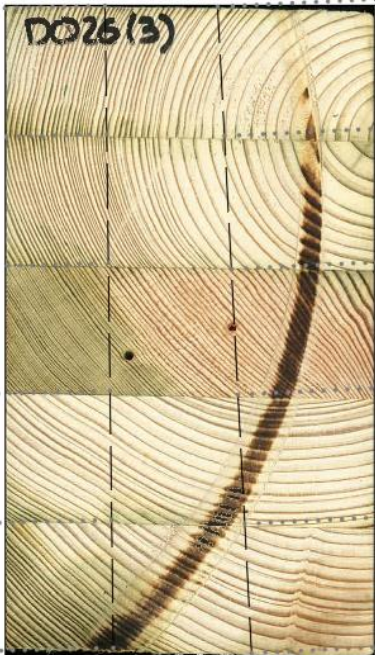
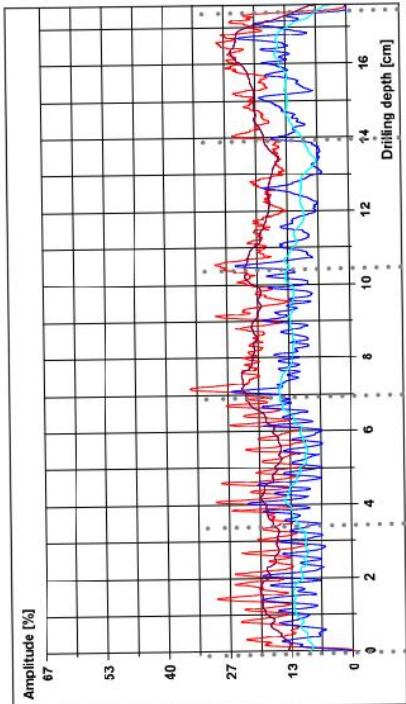
General:

- La tercera tabla corresponde a la zona de machihembrado de la unión dentada y encolada para la formación de las láminas de grandes longitudes que componen la viga.



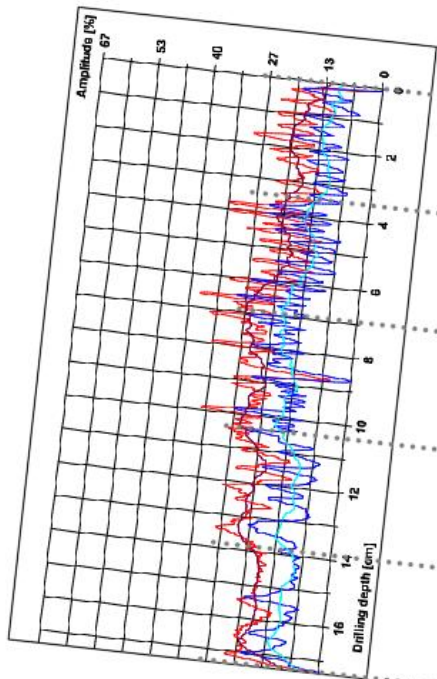

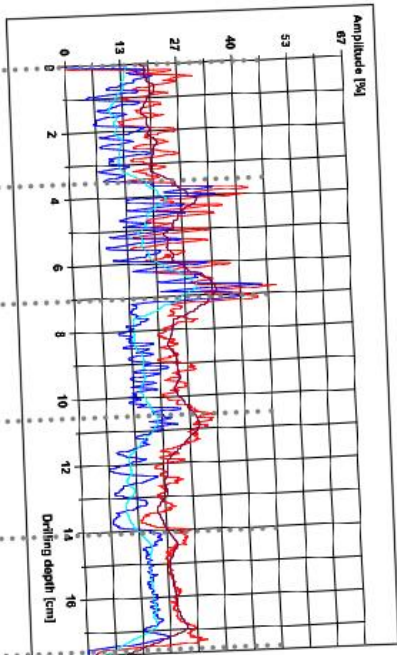
Perforación 2:

- 5,6 cm: bajada de amplitud debida al paso por el orificio del xilohigrómetro.

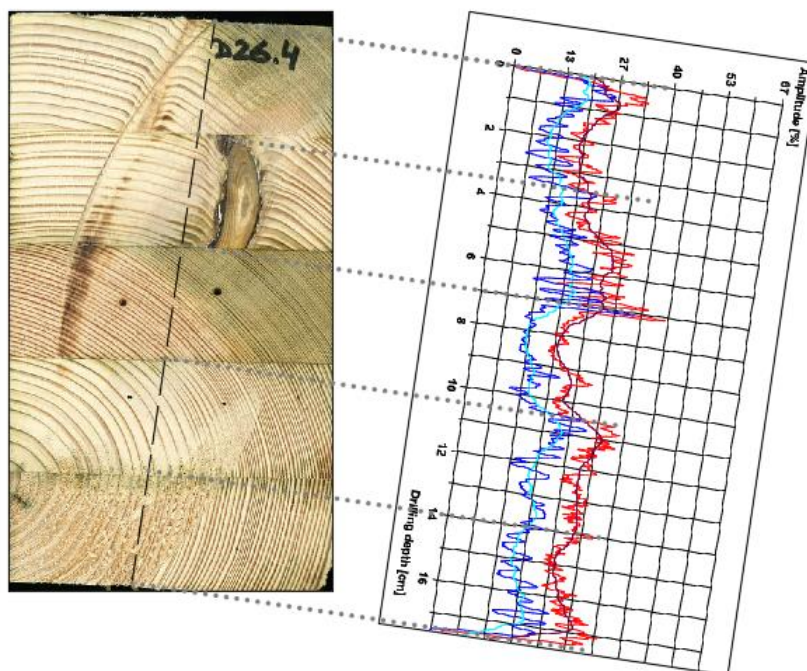


Especie			Nomenclatura		
Pino tanalizado			D026 (3)		
Clase resistente					
GL24					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,459					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
171,99		98,96		31,59	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			16
23/03/2021		250			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					14,8
Fecha		Peso seco (g)			
24/03/2021		217,83			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1730	0,0	1927	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div>Perf. 1 Perf. 2</div> <div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	19,38	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	25,19
	sd_{drill} (%)	4,23		sd_{drill} (%)	5,90
17,4	\bar{X}_{feed} (%)	12,11	17,32	\bar{X}_{feed} (%)	15,78
	sd_{feed} (%)	3,74		sd_{feed} (%)	4,84
Observaciones					
Perforación 2: - 8,2 cm: bajada de amplitud debida al paso por el orificio del xilohigrómetro.					



Especie			Nomenclatura		
Pino tanalizado			D026 (4)		
Clase resistente					
GL24					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,467					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
171,96		99,05		23,6	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			17
23/03/2021		190,3			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			14,6
24/03/2021		166,1			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1789	0,0	2203	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div></div><div><div>Perf. 1</div></div><div><div>Perf. 2</div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	20,05	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	21,66
	sd_{drill} (%)	4,94		sd_{drill} (%)	7,88
17,29	\bar{X}_{feed} (%)	12,60	17,45	\bar{X}_{feed} (%)	14,65
	sd_{feed} (%)	4,65		sd_{feed} (%)	7,17

Perf. 3



Perforación 3			Perforación 4		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	27,27	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	
	sd_{drill} (%)	5,67		sd_{drill} (%)	
17,41	\bar{X}_{feed} (%)	17,93		\bar{X}_{feed} (%)	
	sd_{feed} (%)	4,94		sd_{feed} (%)	

Observaciones

Perforación 1:

- 8,7 cm: bajada de amplitud debida al paso por el orificio del xilohigrómetro.



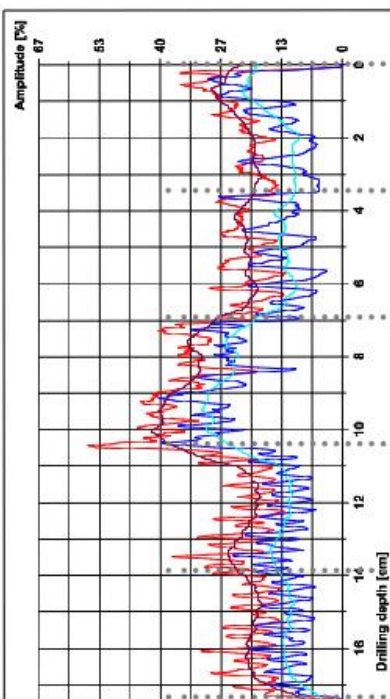
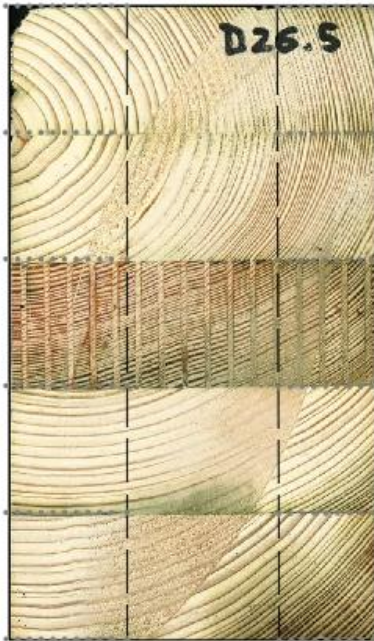
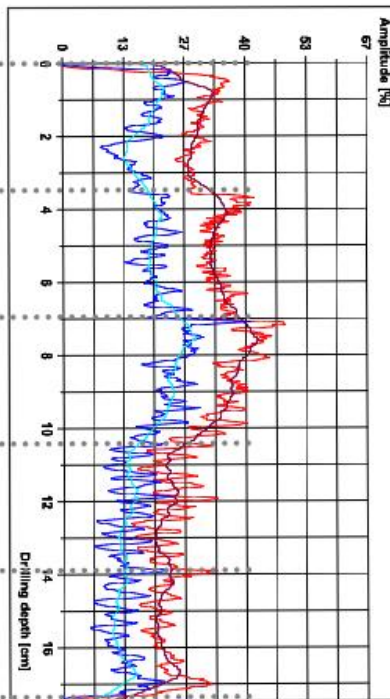
Perforación 2:

- La subida en la intensidad de la tabla 2 se debe a la presencia de un nudo en su paso que puede haber desviado la trayectoria. En la parte central de la tabla existe una caída de los valores de amplitud resistográfica debido a que, con mucha frecuencia, los nudos suelen estar rodeados de bolsas de resina que ofrecen menor resistencia a la perforación.



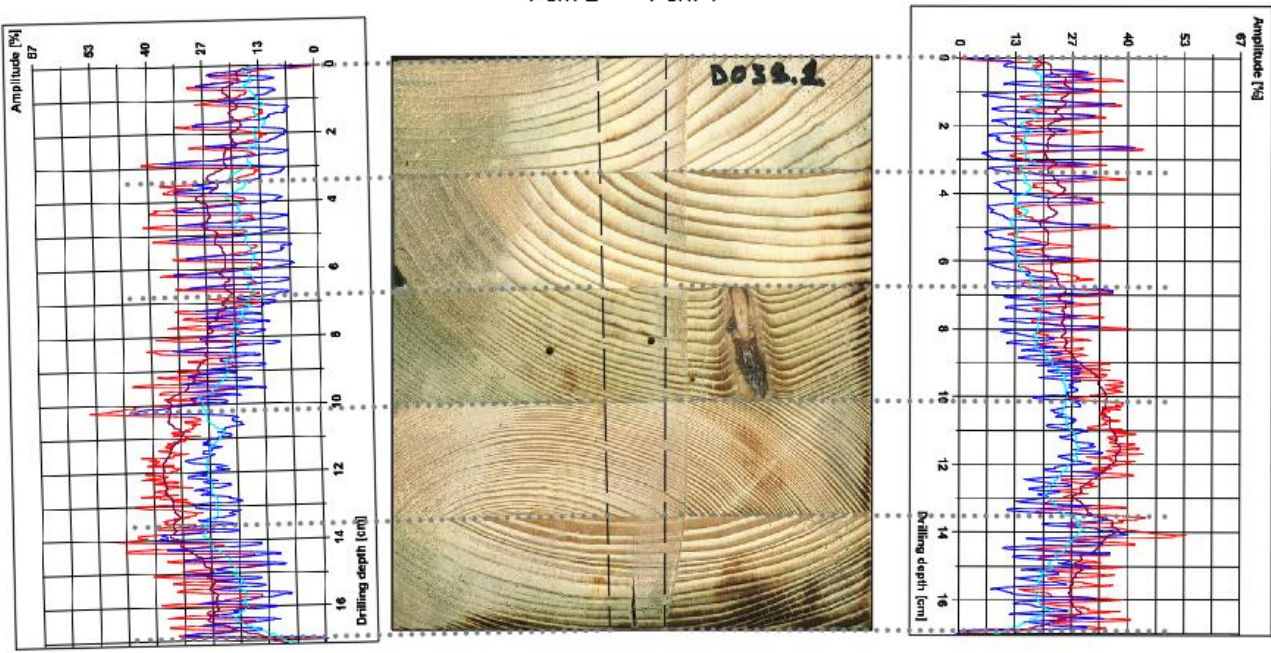
Perforación 3:

- La fuerte desviación se puede deber a la presencia de un nudo en su trayectoria.



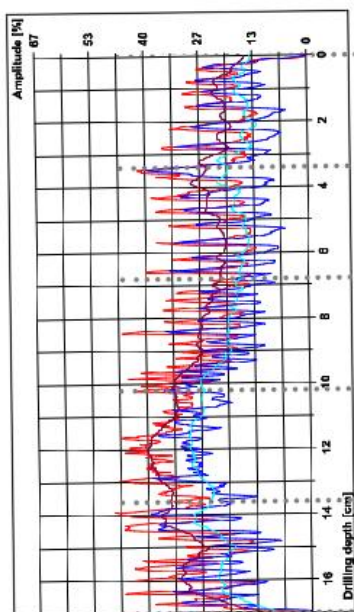
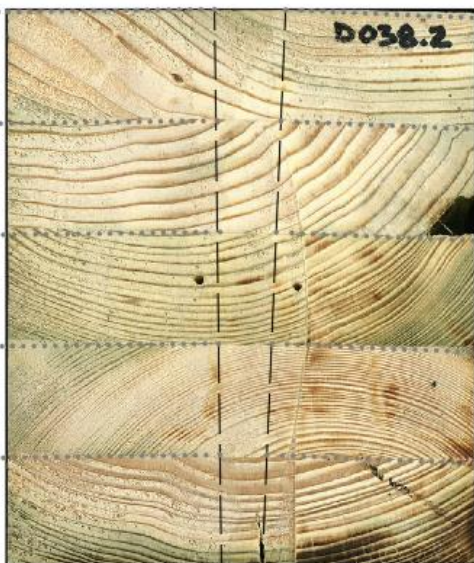
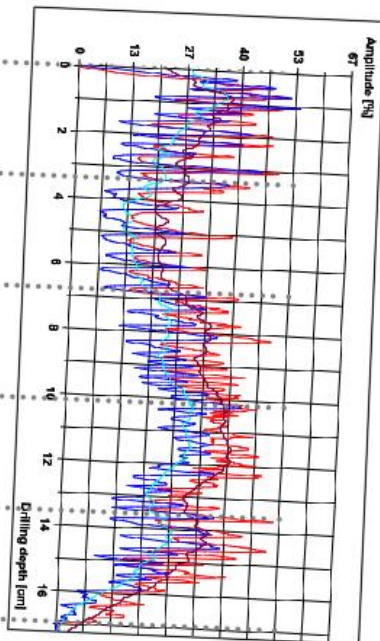


Especie			Nomenclatura		
Pino tanalizado			D026 (5)		
Clase resistente					
GL24					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,495					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
171,74		98,79		29,46	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)					
Fecha		Peso acondicionado (g)		Humedad (%) Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2) 17,5	
23/03/2021		250,3			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					
Fecha		Peso seco (g)		Humedad (%) Secado en estufa (UNE-EN 13183-1) 14,4	
25/03/2021		218,79			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1702	0,0	2203	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div></div><div><div>Perf. 1</div><div></div><div><div>Perf. 2</div></div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,61	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	29,15
	sd_{drill} (%)	4,21		sd_{drill} (%)	7,38
17,31	\bar{X}_{feed} (%)	14,30	17,29	\bar{X}_{feed} (%)	17,88
	sd_{feed} (%)	4,29		sd_{feed} (%)	5,72
Observaciones					
General:					
<div><div>-</div><div>La tercera tabla corresponde a la zona de machihembrado de la unión dentada y encolada para la formación de las láminas de grandes longitudes que componen la viga.</div></div> <div><div>-</div><div>La tercera lámina presenta mayor densidad que el resto.</div></div>					



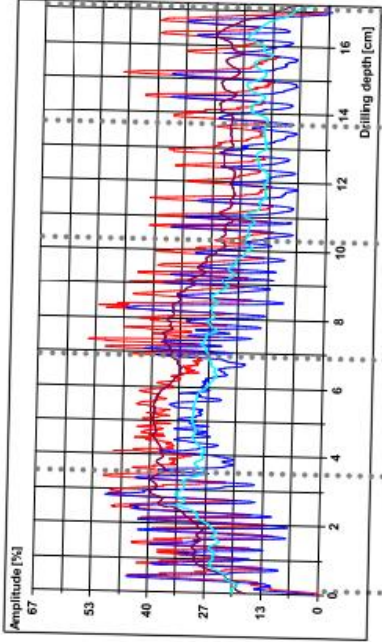
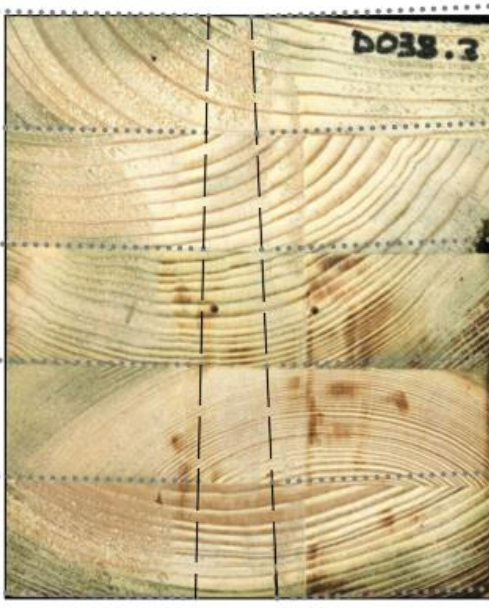
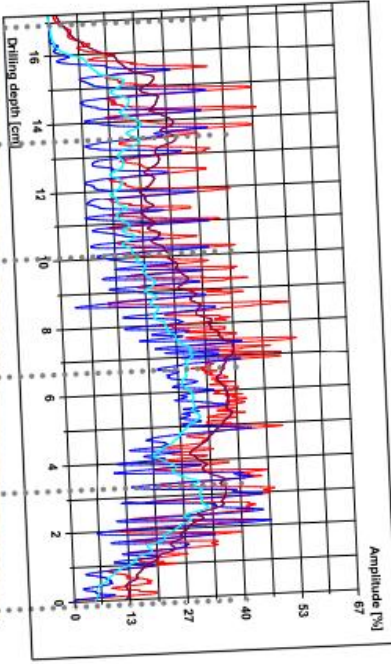


Especie			Nomenclatura		
Pino tanalizado			D038 BIS (1)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,494					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
167,68		139,45		33,53	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			18,2
23/03/2021		389,5			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					13,3
Fecha		Peso seco (g)			
24/03/2021		343,82			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1852	0	1760	0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
Perf. 2 Perf. 1					
					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	27,30	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	28,02
	sd_{drill} (%)	8,41		sd_{drill} (%)	5,19
16,88	\bar{X}_{feed} (%)	20,11	16,91	\bar{X}_{feed} (%)	21,13
	sd_{feed} (%)	8,09		sd_{feed} (%)	4,65
Observaciones					



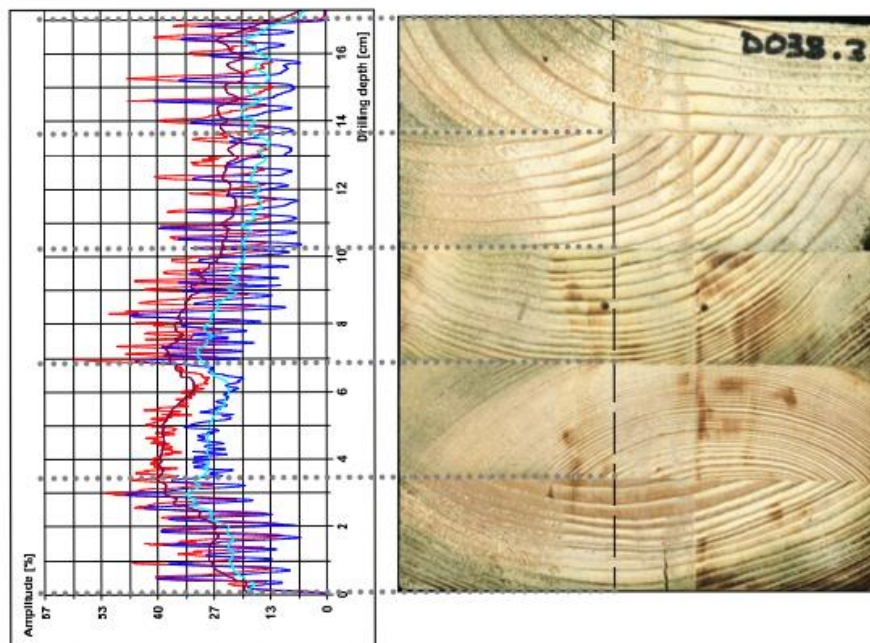
Especie		Nomenclatura			
Pino tanalizado		<div>D038 BIS (2)</div>			
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,566					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
167,67		139,09		30,22	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			18,2
23/03/2021		401,7			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)		13,3	
24/03/2021		354,67			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1903	0	1778	
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div><div><div>Perf. 2</div><div></div></div><div><div>Perf. 1</div><div></div></div><div><div></div></div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	30,60	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	27,63
	sd_{drill} (%)	5,66		sd_{drill} (%)	8,96
16,9	\bar{X}_{feed} (%)	22,32	16,89	\bar{X}_{feed} (%)	20,83
	sd_{feed} (%)	5,55		sd_{feed} (%)	8,02
Observaciones					
<div>Perforación 1:</div> <div><div>-</div><div>La bajada de amplitud de los últimos 1,5 cm corresponde a que la broca siguió el camino de la fisura que se ve en la figura.</div></div>					



Especie			Nomenclatura		
Pino tanalizado			D038 BIS (3)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,503					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
167,18		139,49		31,23	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			17,2
23/03/2021		368,9			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
					13,3
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					
Fecha		Peso seco (g)			
24/03/2021		325,65			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
23/03/2021		2053	0,0	1796	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
Perf. 1 Perf. 2					
					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	31,33	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	27,23
	sd_{drill} (%)	9,81		sd_{drill} (%)	11,16
16,86	\bar{X}_{feed} (%)	22,35	16,34	\bar{X}_{feed} (%)	19,93
	sd_{feed} (%)	3,47		sd_{feed} (%)	10,80



Perf. 3



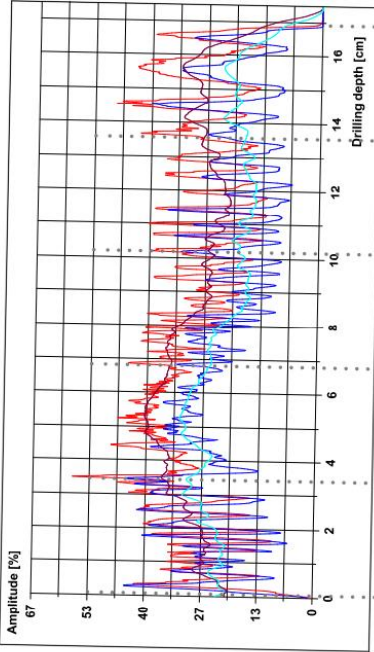
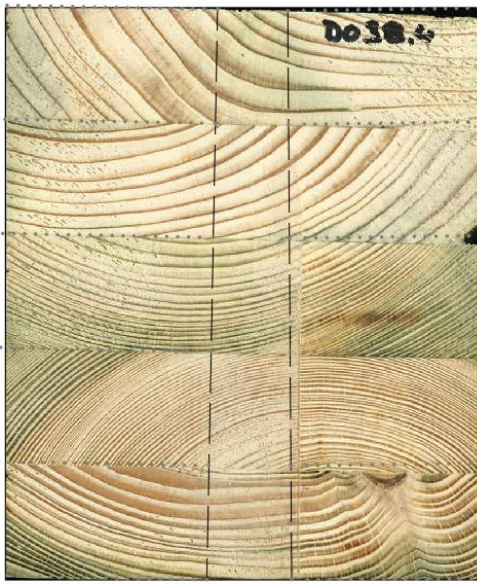
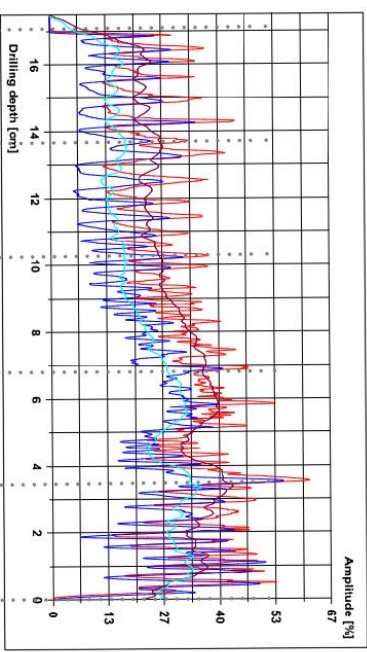


Perforación 3			Perforación 4		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	29,81	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	
	sd_{drill} (%)	5,89		sd_{drill} (%)	
16,92	\bar{X}_{feed} (%)	23,05		\bar{X}_{feed} (%)	
	sd_{feed} (%)	5,18		sd_{feed} (%)	
Observaciones					

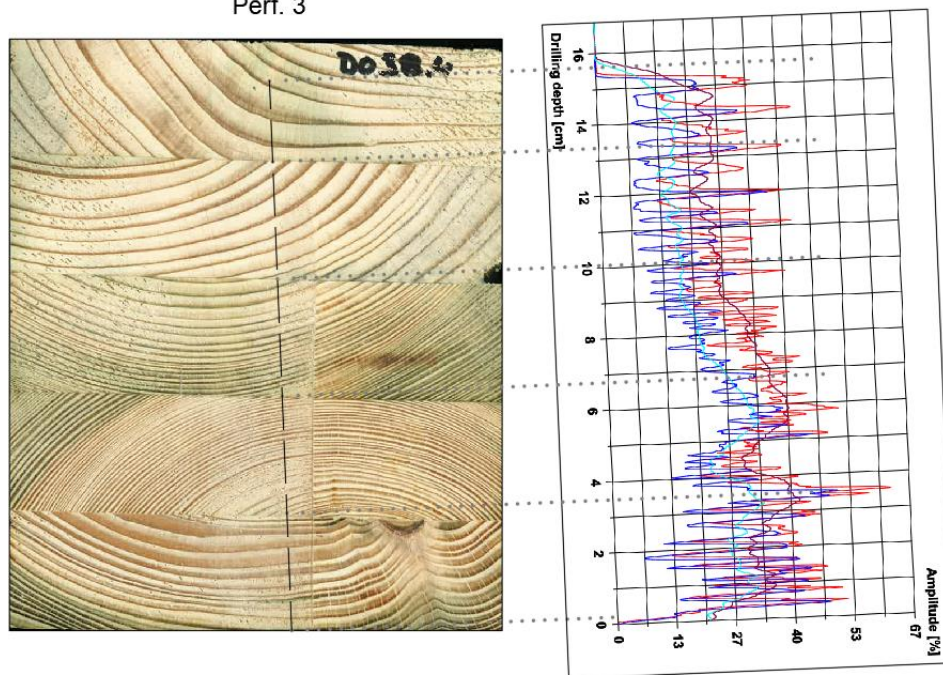
Perforación 2:

- La bajada de amplitud de los primeros 1,2 cm corresponde a la presencia de una fisura observable en la figura.
- La bajada de amplitud del último 1 cm corresponde a que la broca salió por el pretaladro efectuado para realizar el ensayo de ultrasonidos.



Especie			Nomenclatura			
Pino tanalizado			D038 BIS (4)			
Clase resistente						
GL18						
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)						
0,496						
Dimensiones (mm)						
Largo		Ancho		Alto		
167,39		139,66		34,12		
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)	
Fecha		Peso acondicionado (g)			17,2	
23/03/2021		398,1				
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)	
Fecha		Peso seco (g)			13,4	
24/03/2021		351,07				
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)						
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)		
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica	
		1975	0,0	1742	0,0	
Perfiles resistográficos						
Fecha	23/03/2021	 Resist. taladrado	 Resist. al avance			
Perf. 1 Perf. 2						
						
Perforación 1			Perforación 2			
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	31,30	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	29,83	
	sd_{drill} (%)	2,83		sd_{drill} (%)	9,77	
16,75	\bar{X}_{feed} (%)	22,11	16,94	\bar{X}_{feed} (%)	22,34	
	sd_{feed} (%)	8,75		sd_{feed} (%)	9,93	

Perf. 3





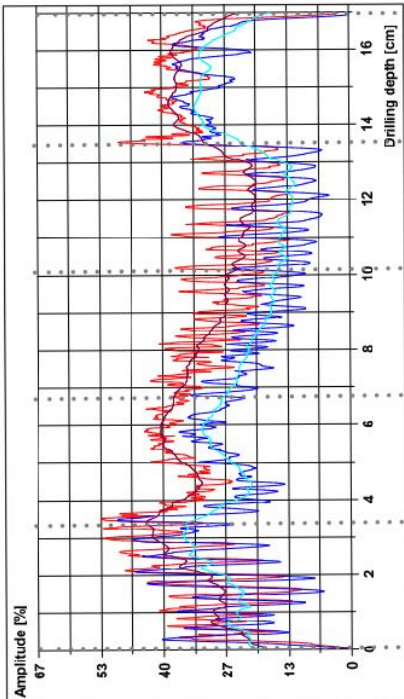
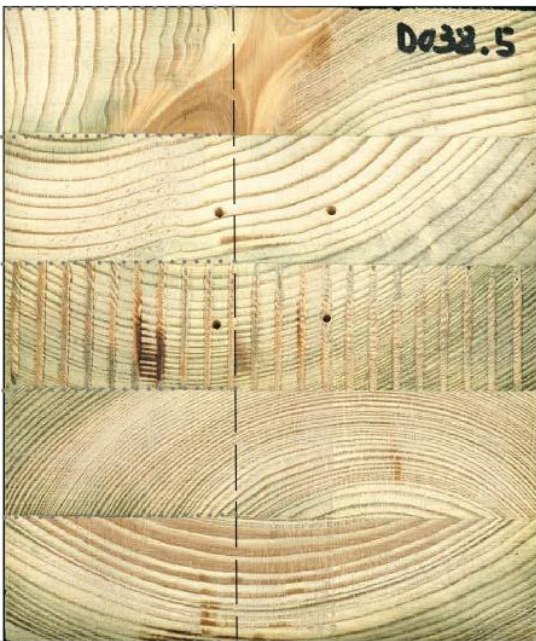
Perforación 3			Perforación 4		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	30,66	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	
	sd_{drill} (%)	5,25		sd_{drill} (%)	
15,26	\bar{X}_{feed} (%)	22,38		\bar{X}_{feed} (%)	
	sd_{feed} (%)	9,56		sd_{feed} (%)	

Observaciones



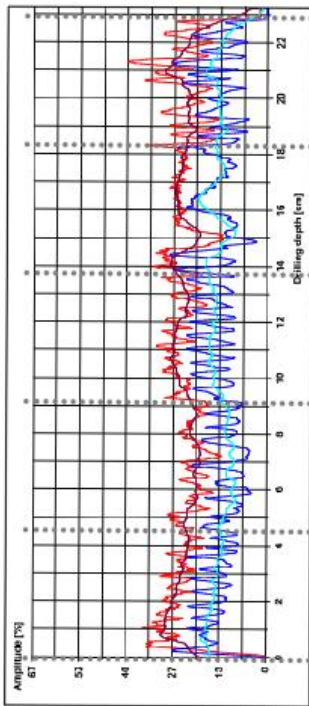

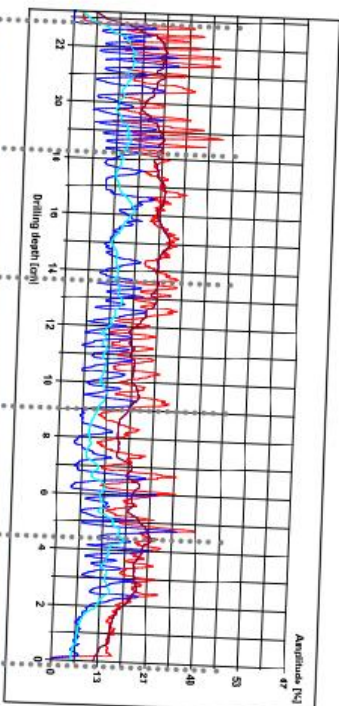
Perforación 3:

- La resistografía no termina en el fin de la longitud de la pieza porque la broca salió por el pretaladro efectuado para realizar el ensayo de ultrasonidos.



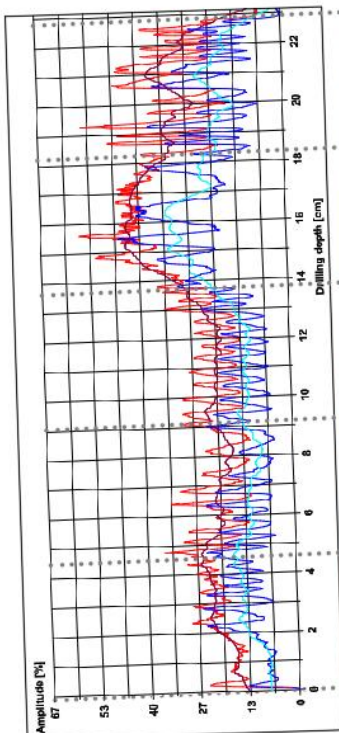

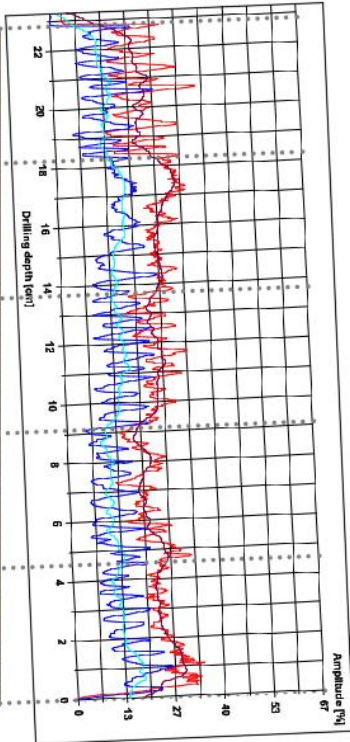


Especie		Nomenclatura			
Pino tanalizado		D038 BIS (5)			
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,536					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
167,38		139,65		34,44	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)					
Fecha		Peso acondicionado (g)		Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
23/03/2021		434			16,1
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					
Fecha		Peso seco (g)		Humedad (%)	Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
24/03/2021		382,97			13,3
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1994	0	1326	0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
Perf. 1					
					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	33,47	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	
	sd_{drill} (%)	4,77		sd_{drill} (%)	
16,87	\bar{X}_{feed} (%)	23,94		\bar{X}_{feed} (%)	
	sd_{feed} (%)	9,37		sd_{feed} (%)	
Observaciones					
Perforación 1:					
- La subida de amplitud de la última tabla corresponde al nudo que se ve en la figura.					



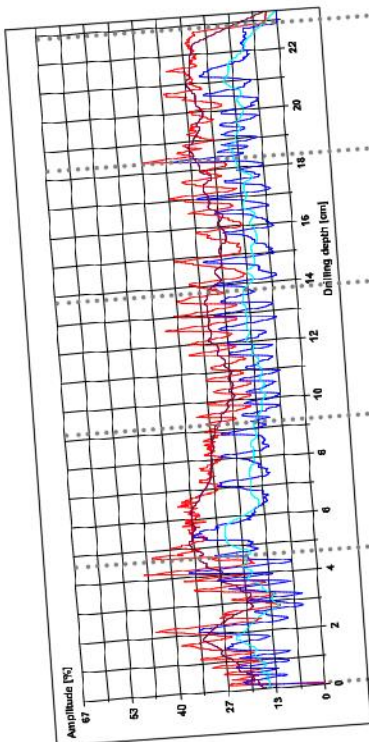

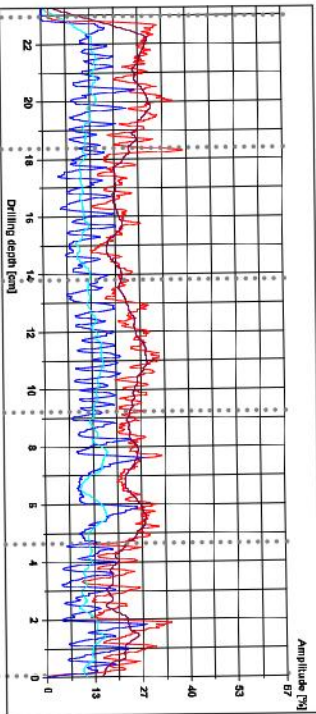


Especie			Nomenclatura		
Abeto			D041 (1)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,460					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,05		100,22		28,38	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)					
Fecha		Peso acondicionado (g)		Humedad (%)	
24/03/2021		297,3			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					
Fecha		Peso seco (g)		Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)	
26/03/2021		263,47			
Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)					
12,8					
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1695	0,0	2056	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div><div>Perf. 2</div><div></div></div><div><div>Perf. 1</div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,88	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,66
	sd_{drill} (%)	6,03		sd_{drill} (%)	4,57
	\bar{X}_{feed} (%)	13,57		\bar{X}_{feed} (%)	13,88
	sd_{feed} (%)	5,66		sd_{feed} (%)	4,97
22,79			22,8		
Observaciones					
Perforación 1:					
- El inicio constante de la perforación se debe al taladrado tangencial a uno de los anillos de crecimiento.					



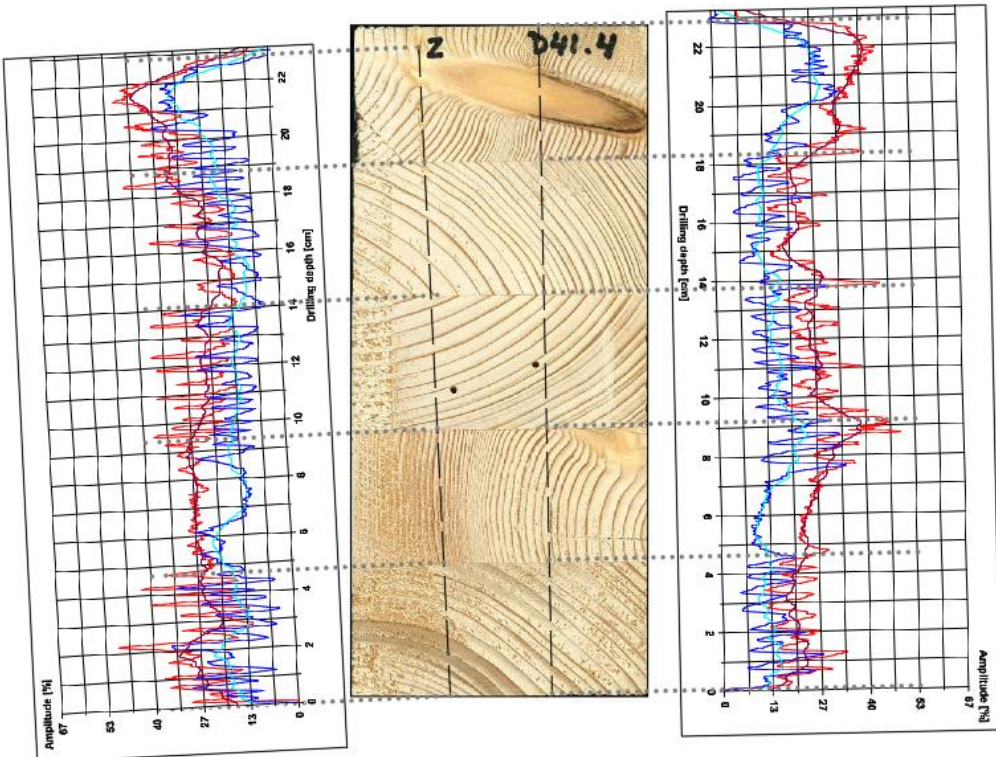


Especie		Nomenclatura			
Abeto		<div>D041 (2)</div>			
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,479					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,45		99,74		28,25	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			16
24/03/2021		307,5			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			13,2
29/03/2021		271,58			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1715	0,0	2146	19
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div><div>Perf. 2</div></div><div></div><div><div>Perf. 1</div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	24,30	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,41
	sd_{drill} (%)	4,72		sd_{drill} (%)	2,72
22,83	\bar{X}_{feed} (%)	14,06	22,84	\bar{X}_{feed} (%)	15,33
	sd_{feed} (%)	4,72		sd_{feed} (%)	4,60
Observaciones					
Perforación 2: - La subida en la intensidad de la tabla 4 se puede deber a la presencia de un nudo.					



Especie		Nomenclatura			
Abeto		D041 (3)			
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,464					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,42		100,43		30,97	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,9
24/03/2021		328			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)		12,6	
26/03/2021		291,3			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1803	0,0	2127	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div><div>Perf. 2</div></div><div><div>Perf. 1</div></div><div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,48	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	24,73
	sd_{drill} (%)	4,96		sd_{drill} (%)	6,30
22,78	\bar{X}_{feed} (%)	12,99	22,85	\bar{X}_{feed} (%)	13,63
	sd_{feed} (%)	4,56		sd_{feed} (%)	3,34
Observaciones					



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D041 (4)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,428					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,85		99,82		29,67	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,7
24/03/2021		289,9			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)		13,4	
29/03/2021		255,57			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1758	0,0	1787	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
Perf. 2 Perf. 1					
					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	25,01	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	25,01
	sd_{drill} (%)	2,18		sd_{drill} (%)	7,16
22,84	\bar{X}_{feed} (%)	15,24	22,67	\bar{X}_{feed} (%)	14,33
	sd_{feed} (%)	3,73		sd_{feed} (%)	2,26



Observaciones



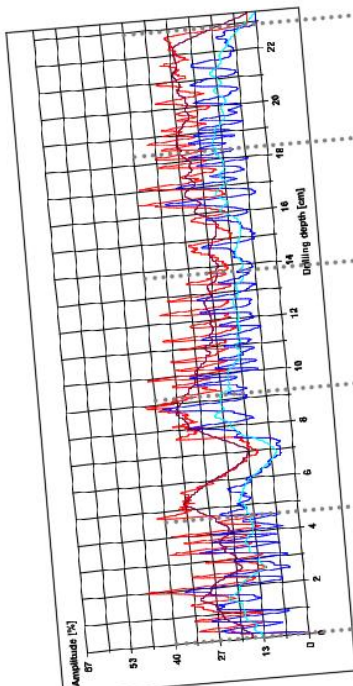

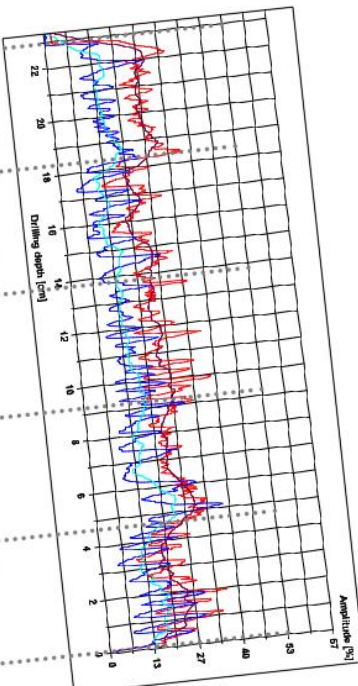
Perforación 1:

- La subida en la intensidad de la tabla 5 se debe a la presencia de un nudo visible en la figura.



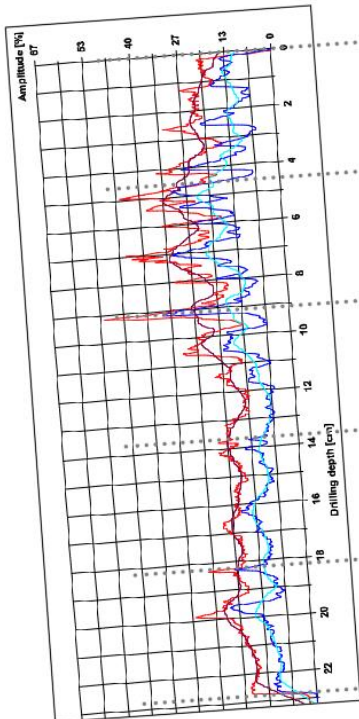
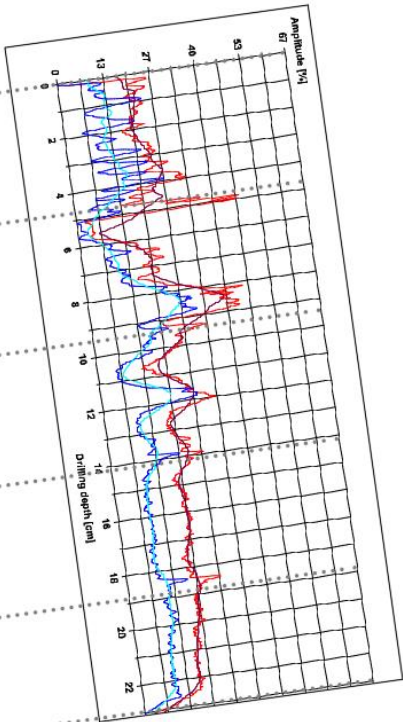
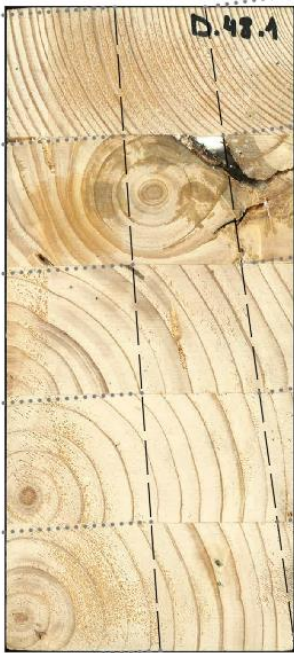
Perforación 2:

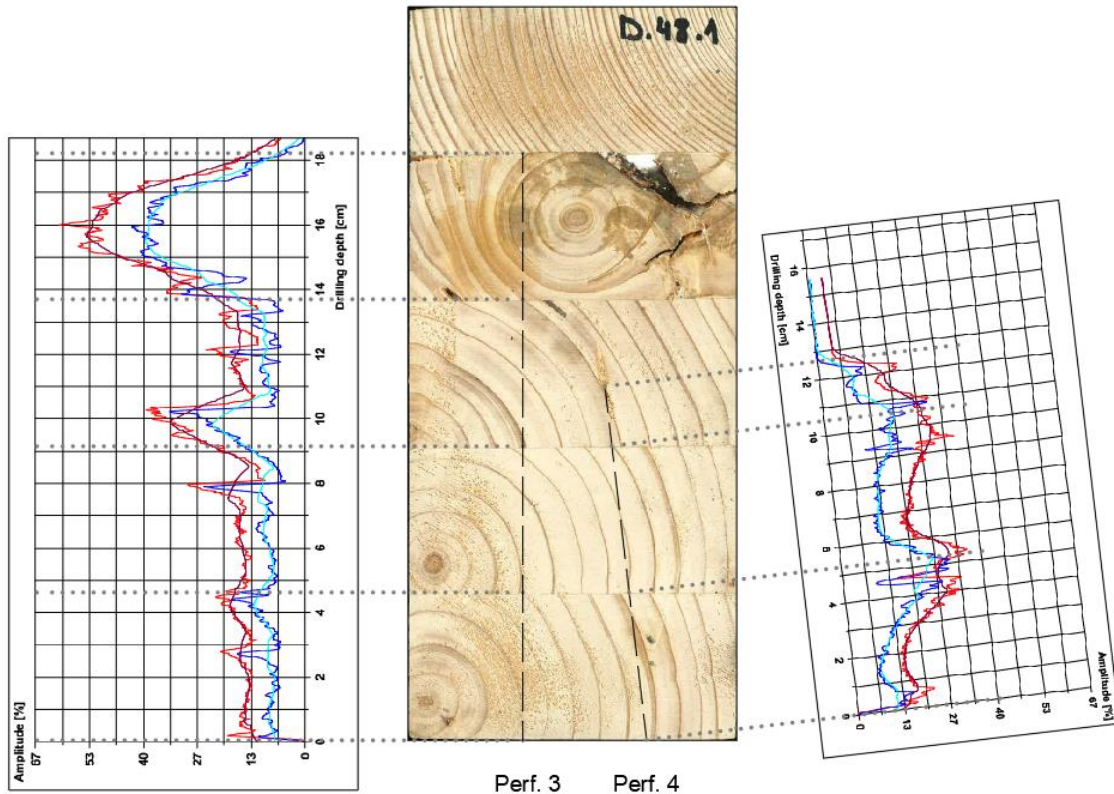
- El nudo desvió en el final de la perforación la broca y salió por la parte superior.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D041 (5)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,451					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,3		99,73		29,7	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,9
24/03/2021		303,2			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)		12,4	
26/03/2021		269,69			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1720,5	5,5	1868	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div><p>Perf. 2</p></div><div><p>Perf. 1</p></div><div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	24,09	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,73
	sd_{drill} (%)	4,95		sd_{drill} (%)	7,21
	\bar{X}_{feed} (%)	14,76		\bar{X}_{feed} (%)	13,18
	sd_{feed} (%)	3,02		sd_{feed} (%)	3,70
22,86			22,83		
Observaciones					
Perforación 2:					
- 7 cm: bajada de amplitud debida al paso por la existencia de una acebolladura.					



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D048 BIS (1)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,471					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,26		101,38		30,48	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,5
23/03/2021		329,9			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			12,5
24/03/2021		293,37			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1736	0,0	2374	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div><p>Perf. 1</p></div><div><p>Perf. 2</p></div><div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	19,57	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	20,20
	sd_{drill} (%)	1,68		sd_{drill} (%)	2,62
22,75	\bar{X}_{feed} (%)	11,75	22,88	\bar{X}_{feed} (%)	10,25
	sd_{feed} (%)	2,71		sd_{feed} (%)	1,19



Perforación 3			Perforación 4		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	16,12	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,61
	sd_{drill} (%)	2,39		sd_{drill} (%)	5,84
18,46	\bar{X}_{feed} (%)	9,44	12,43	\bar{X}_{feed} (%)	13,02
	sd_{feed} (%)	2,14		sd_{feed} (%)	1,45

Observaciones

General:

- Esta probeta cuenta con una zona muy degradada en la lámina 2 empezando por arriba correspondiente a una bolsa de resina alrededor de un nudo bastante destacado.

Perforación 1:

- En la lámina 2 se observa un incremento de la amplitud resistográfica causada por la presencia de un nudo.

Perforación 2:

- Baja amplitud resistográfica al atravesar una zona vacía, pudiendo corresponder a una bolsa de resina.



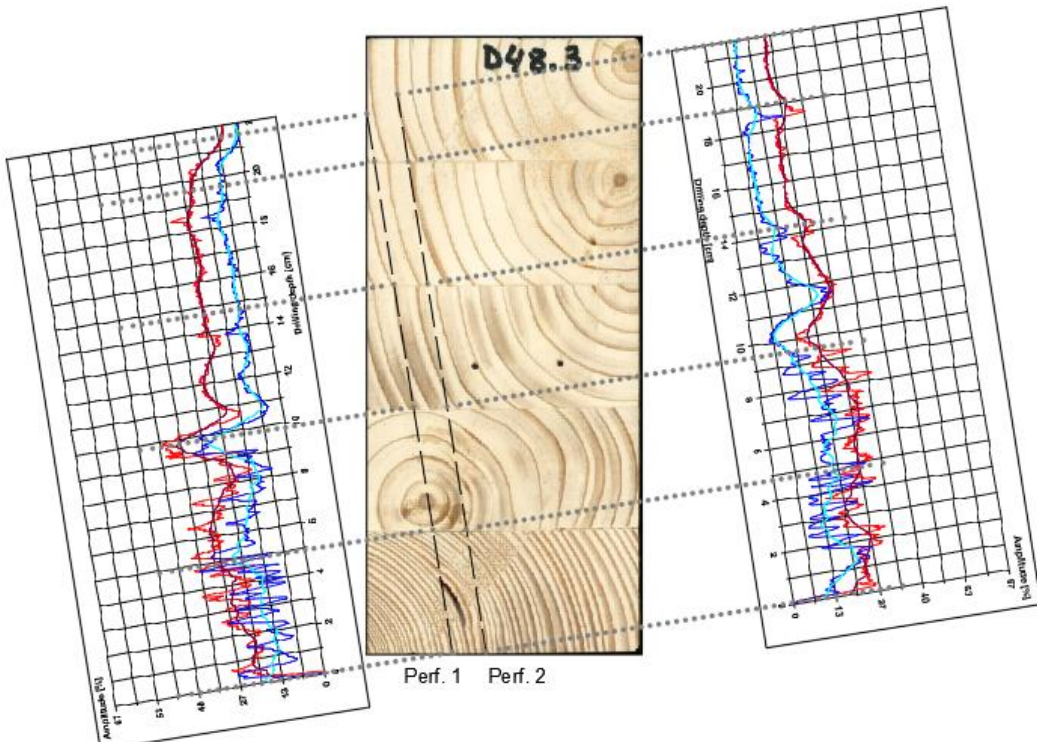
Perforación 3:

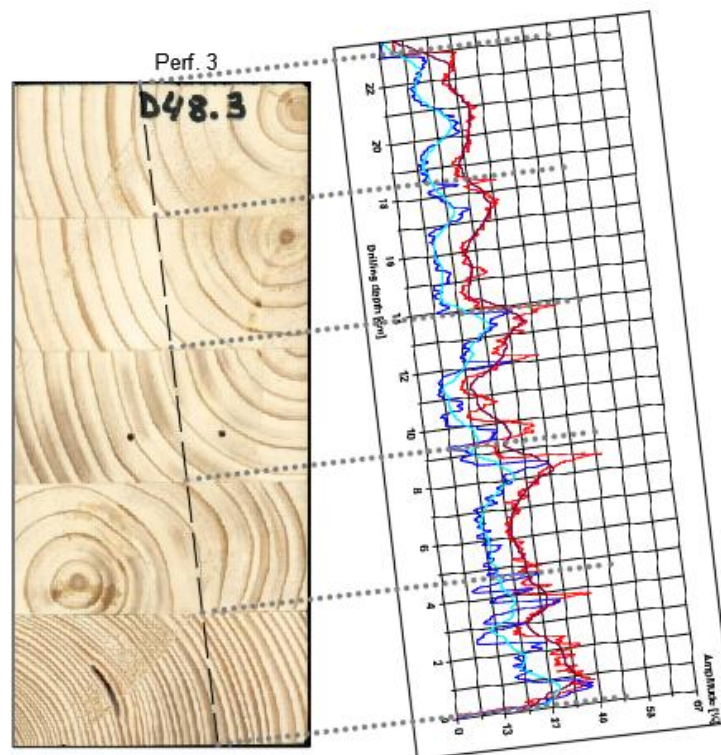
- En la lámina 4, respecto al comienzo de esta perforación, se observa un incremento de la amplitud resistográfica causada por la presencia de un nudo.
- En esta perforación se ha experimentado una desviación por el paso del nudo de la tabla 4, que ha hecho que salga por la superficie inferior de la probeta.

Perforaciones 4:

- En esta perforación se ha experimentado una desviación, que ha hecho que salga por la superficie superior.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			<div>D048 BIS (3)</div>		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,425					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,05		101,62		28,55	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15
24/03/2021		279,4			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					12,7
Fecha		Peso seco (g)			
29/03/2021		247,88			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1736	0,0	2469	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	21,36	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,00
	sd_{drill} (%)	5,93		sd_{drill} (%)	4,29
21,00	\bar{X}_{feed} (%)	10,06	21,64	\bar{X}_{feed} (%)	10,96
	sd_{feed} (%)	1,62		sd_{feed} (%)	1,94





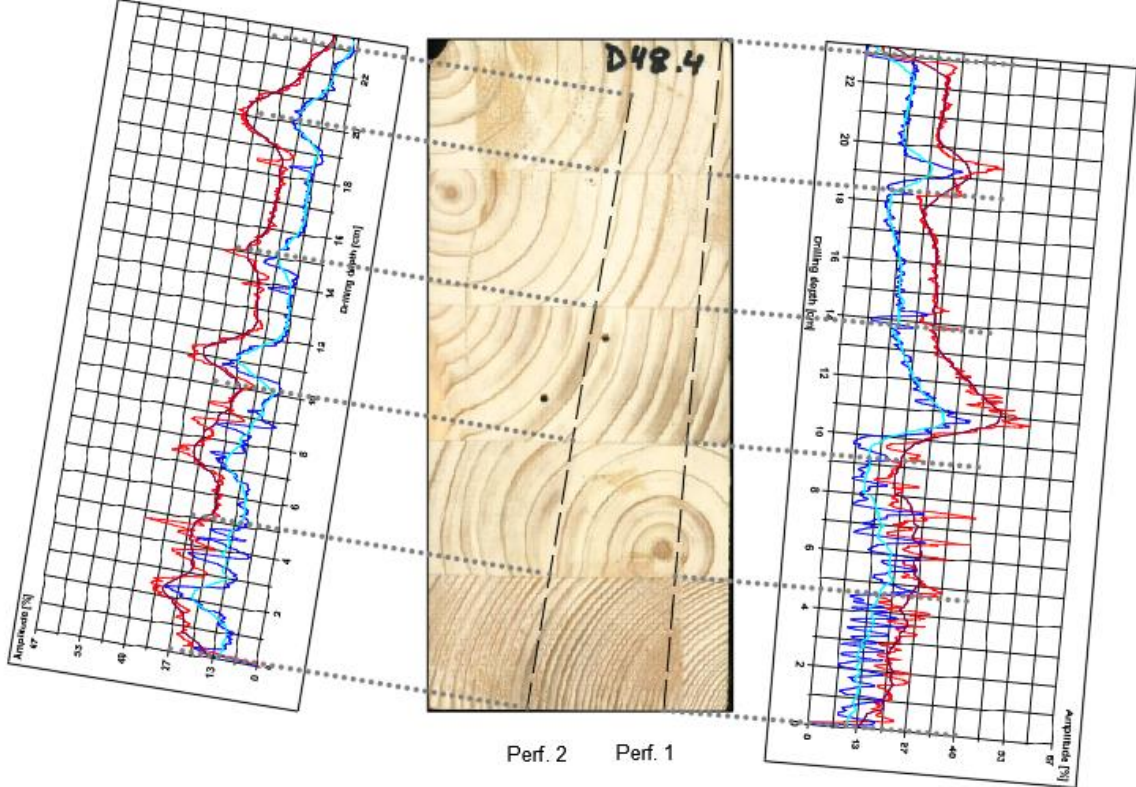
Perforación 3			Perforación 4		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,14	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	
	sd_{drill} (%)	3,07		sd_{drill} (%)	
22,99	\bar{X}_{feed} (%)	13,09		\bar{X}_{feed} (%)	
	sd_{feed} (%)	3,71		sd_{feed} (%)	

Observaciones



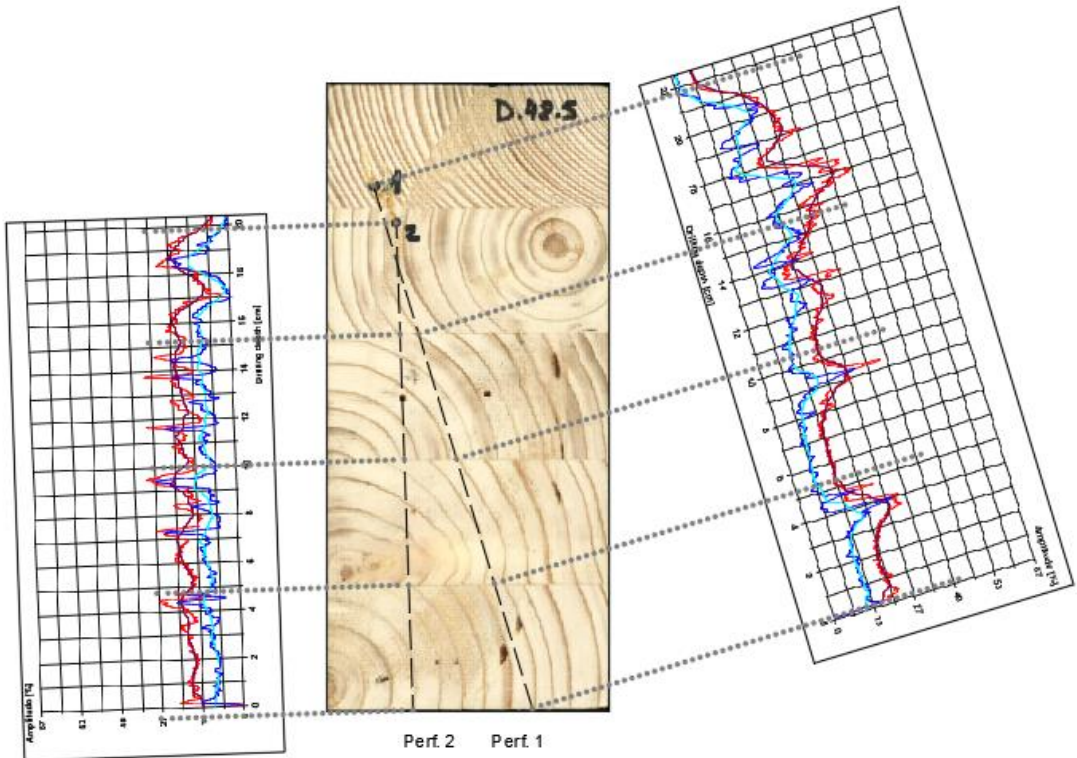
General:

- Las zonas de amplitud semi constante corresponden a perforaciones tangenciales a los anillos de crecimiento.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D048 BIS (4)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,403					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,72		101,53		31,88	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,2
24/03/2021		296,9			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)				Humedad (%)	Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			12,7
29/03/2021		263,4			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1715	0,0	2329	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,48	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	20,60
	sd_{drill} (%)	3,14		sd_{drill} (%)	3,24
22,89	\bar{X}_{feed} (%)	14,08	22,51	\bar{X}_{feed} (%)	10,43
	sd_{feed} (%)	2,74		sd_{feed} (%)	2,76
Observaciones					
Perforación 2:					
<div><div>- La trayectoria se desvió y salió por la superficie de la cara inferior.</div><div>- Se aprecia un incremento puntual en las interfases encoladas entre láminas.</div></div>					



Especie			Nomenclatura		
Abeto			<div>D048 BIS (5)</div>		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,405					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,26		101,51		31,17	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,2
23/03/2021		291,4			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			13,2
24/03/2021		257,53			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1736	0,0	2374	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,21	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	16,82
	sd_{drill} (%)	7,31		sd_{drill} (%)	3,98
21,11	\bar{X}_{feed} (%)	12,63	19,65	\bar{X}_{feed} (%)	9,54
	sd_{feed} (%)	3,25		sd_{feed} (%)	4,01



Observaciones



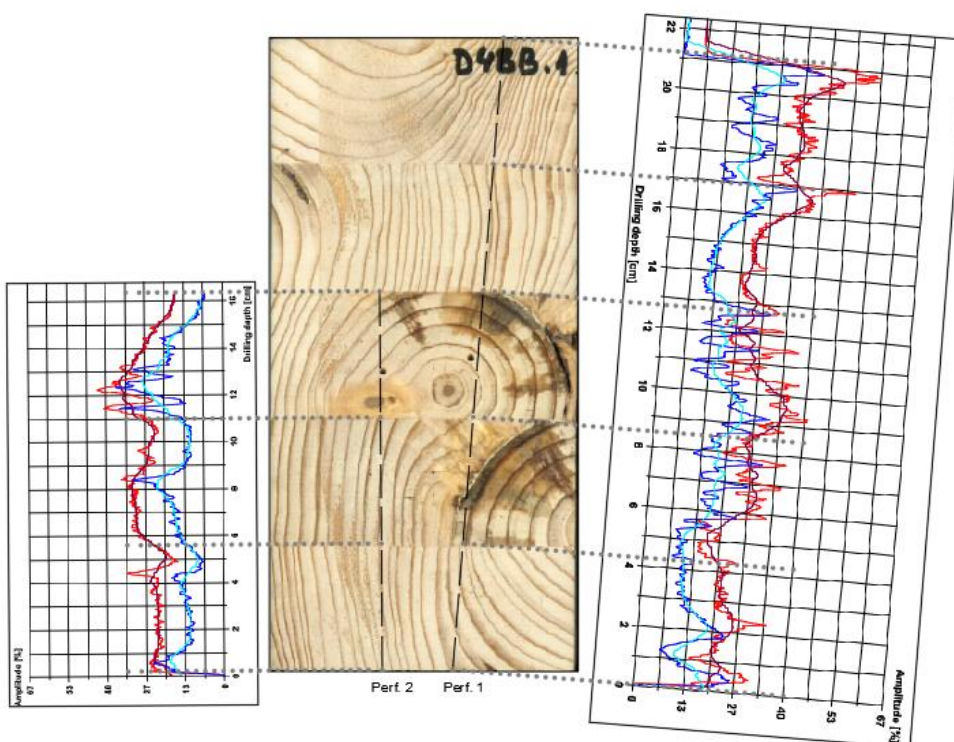
General:

- Ambas resistografías se han desviado y han salido por la cara superior.

Perforación 1:

- Se puede apreciar que la trayectoria no es exactamente la trazada entre los orificios de entrada y salida, ya que se observa en la resistografía las interfases encoladas, que corresponden con los picos de mayor amplitud.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D048 BIS 2 (1)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,495					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
208,46		100,41		29,92	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			16,9
25/03/2021		310,1			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)		12,2	
26/03/2021		276,26			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
25/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		2808	0,0	1807	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	25/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	26,21	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	25,93
	sd_{drill} (%)	4,21		sd_{drill} (%)	5,34
21,1	\bar{X}_{feed} (%)	17,26	16,27	\bar{X}_{feed} (%)	14,86
	sd_{feed} (%)	5,90		sd_{feed} (%)	3,04



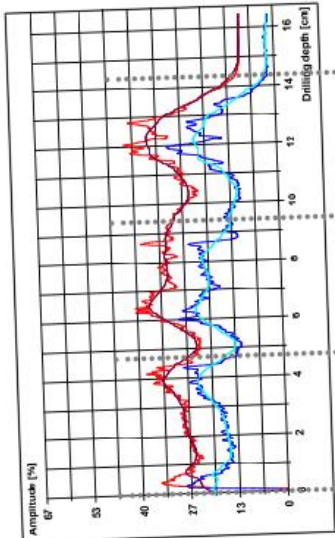

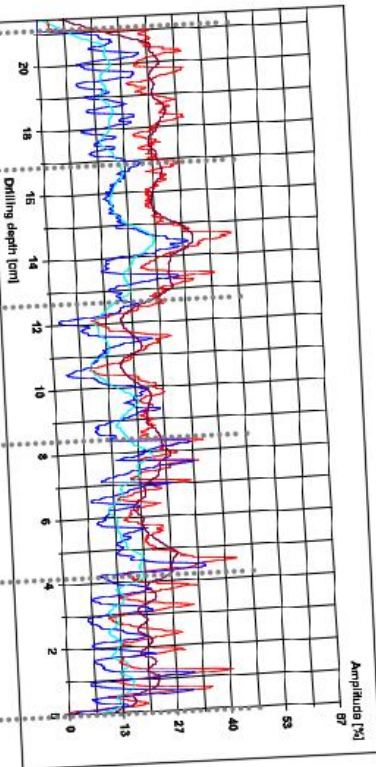


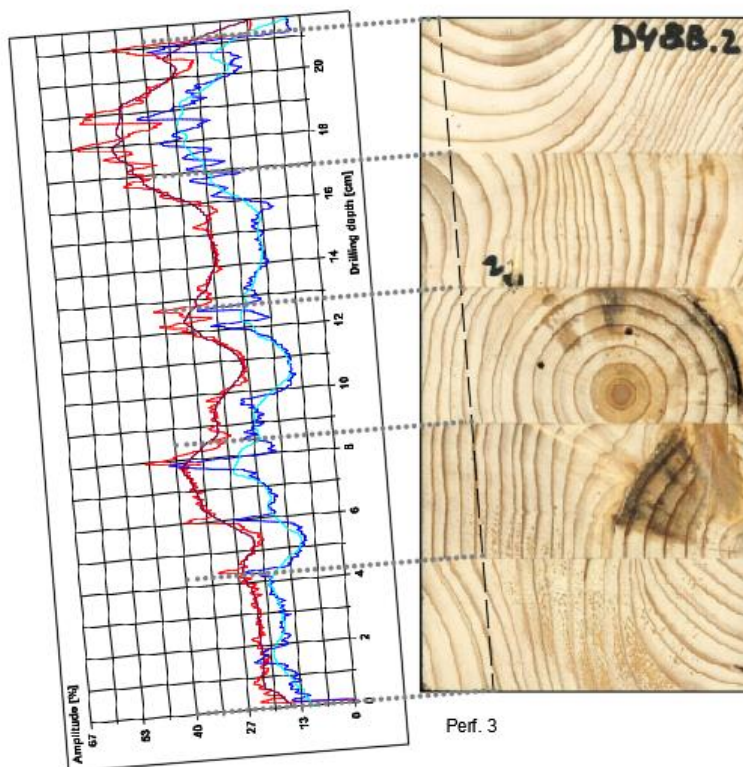
Observaciones

Perforación 2:

- 12cm: La subida de la amplitud resistográfica corresponde a la presencia de un nudo en la trayectoria.
- La parada de la perforación es debido a la desviación de la broca y salida de la misma por la superficie inferior de la probeta.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			<div>D048 BIS 2 (2)</div>		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,495					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
208,52		100,14		31,11	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			17,5
24/03/2021		322,4			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			12,9
26/03/2021		285,57			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		2520	0,0	1689	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div></div><div></div><div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	24,44	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	29,31
	sd_{drill} (%)	6,68		sd_{drill} (%)	5,18
21,04	\bar{X}_{feed} (%)	16,18	13,77	\bar{X}_{feed} (%)	18,01
	sd_{feed} (%)	6,26		sd_{feed} (%)	5,04



Perforación 3			Perforación 4		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	27,86	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	
	sd_{drill} (%)	2,46		sd_{drill} (%)	
21,13	\bar{X}_{feed} (%)	17,69		\bar{X}_{feed} (%)	
	sd_{feed} (%)	3,24		sd_{feed} (%)	

Observaciones



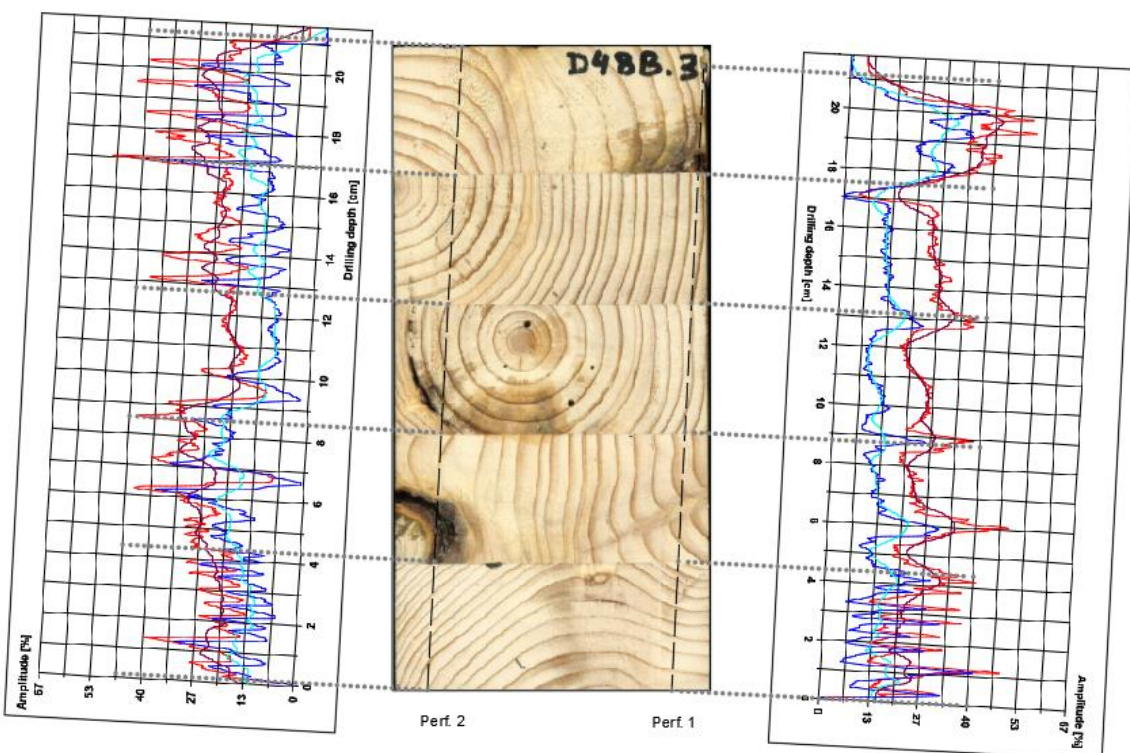
Perforación 1:

- 10 y 12 cm: bajada de amplitud debida al paso por la existencia de una acebolladura.

Perforación 2:

- La broca de la resistografía 2 se ha desviado y ha salido por la cara superior.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			<div>D048 BIS 2 (3)</div>		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,513					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
208,42		100,44		28,78	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			17,3
24/03/2021		309,7			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			12,4
26/03/2021		275,65			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		2685	0,0	1723	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,66	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,51
	sd_{drill} (%)	9,77		sd_{drill} (%)	9,16
20,62	\bar{X}_{feed} (%)	12,15	21,03	\bar{X}_{feed} (%)	13,06
	sd_{feed} (%)	1,64		sd_{feed} (%)	2,42



Observaciones



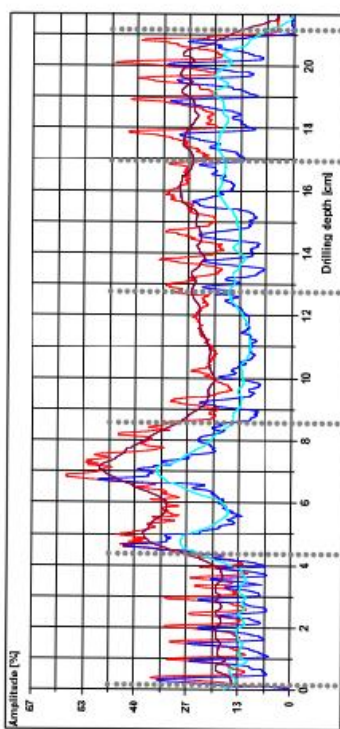
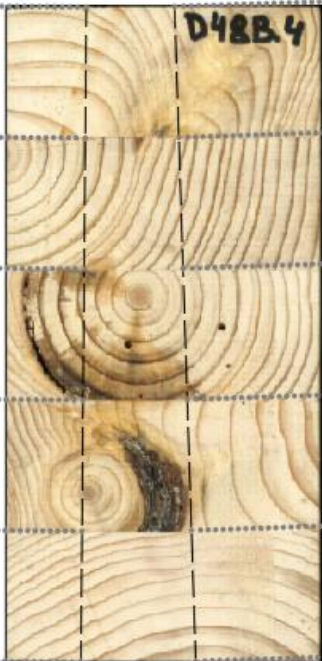
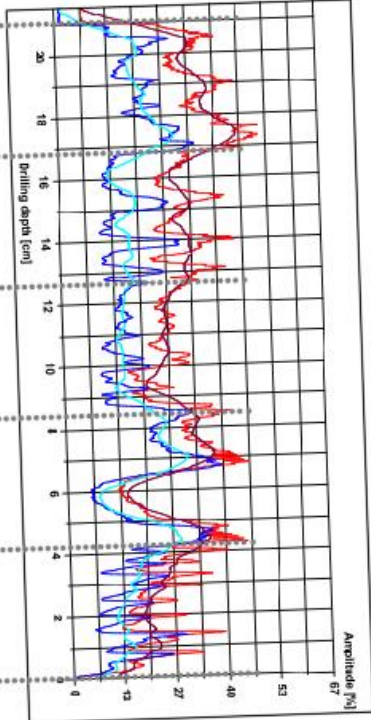
Perforación 1:

- 17 cm: La amplitud nula es debido a la falta de material en esa zona de la probeta.



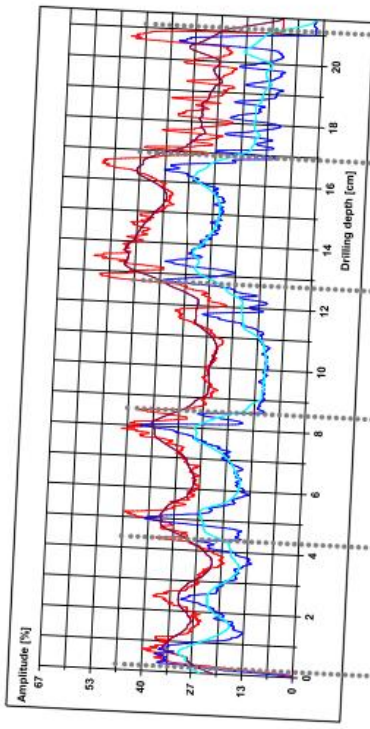
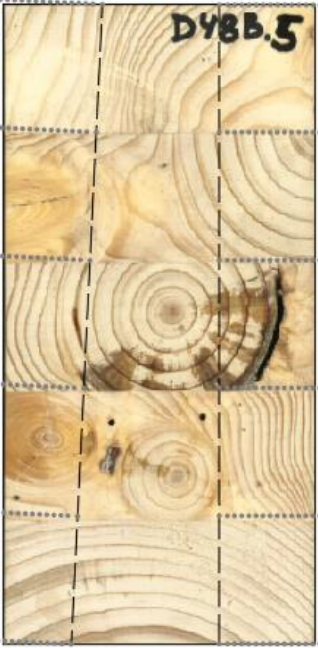
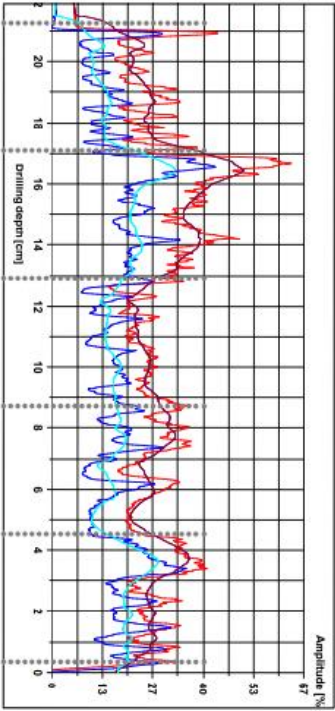
Perforación 2:

- 6,7 y 9,2 cm: La amplitud baja es debido a la falta de material en esa zona de la probeta.



Especie		Nomenclatura			
Abeto		<div>D048 BIS 2 (4)</div>			
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,517					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
208,13		100,47		32,15	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			17,8
24/03/2021		347,8			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)				Humedad (%)	Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			12,2
26/03/2021		309,89			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		2374	0,0	1989	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div></div><div></div><div></div><div>Perf. 2 Perf. 1</div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	28,12	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,54
	sd_{drill} (%)	5,43		sd_{drill} (%)	11,16
21,00	\bar{X}_{feed} (%)	15,65	21,03	\bar{X}_{feed} (%)	14,84
	sd_{feed} (%)	2,44		sd_{feed} (%)	8,88
Observaciones					
General:					
- En ambas perforaciones se observa bajas amplitudes en las láminas 2 por el deterioro local de la zona.					



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D048 BIS 2 (5)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,520					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
207,68		100,54		34,13	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			16,3
24/03/2021		371,4			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)		12,6	
26/03/2021		329,86			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		2102	0,0	2127	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div></div><div></div><div><div></div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	26,54	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	29,41
	sd_{drill} (%)	10,38		sd_{drill} (%)	3,17
21,04	\bar{X}_{feed} (%)	16,50	20,94	\bar{X}_{feed} (%)	17,71
	sd_{feed} (%)	8,12		sd_{feed} (%)	5,23



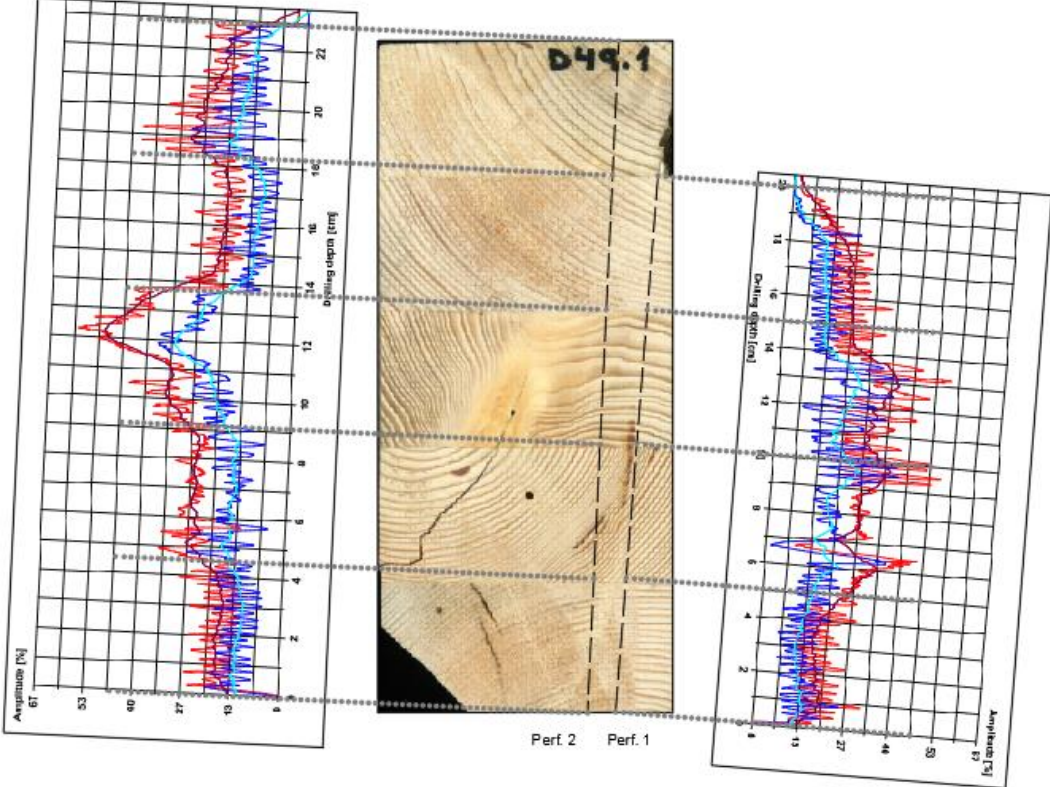


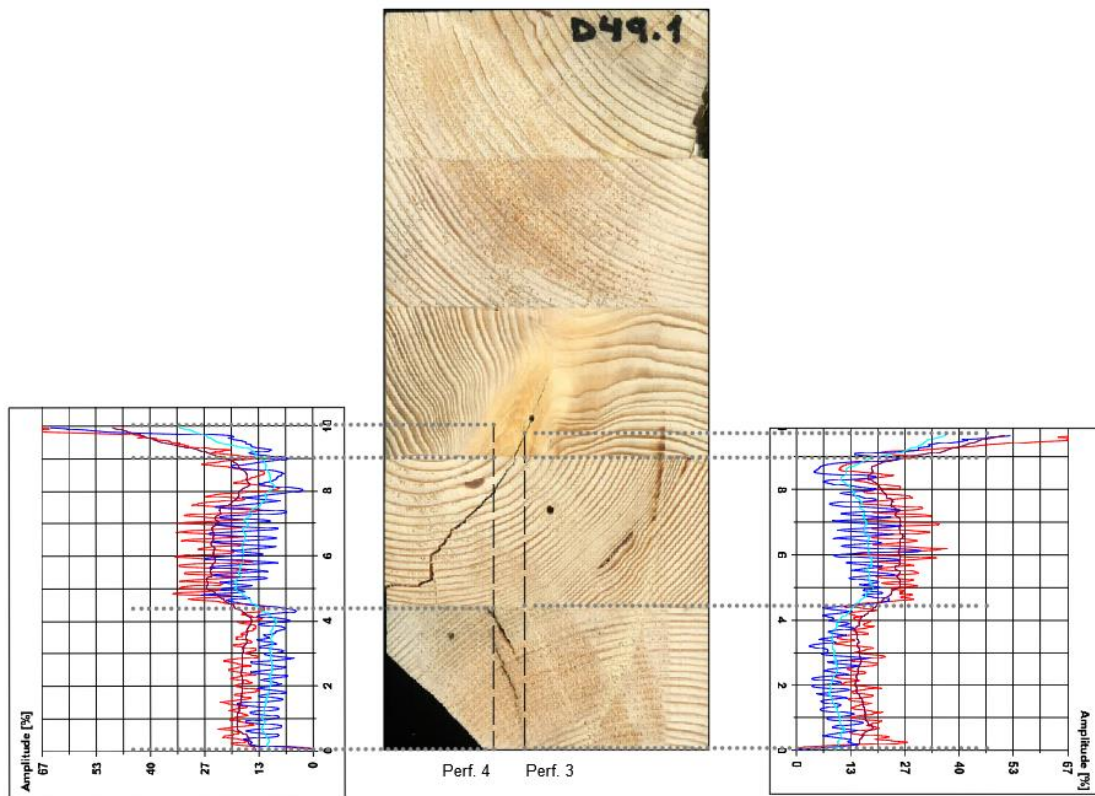
Observaciones

Perforación 2:

- En las láminas 2 y 3 se observa el decaimiento de la amplitud resistográfica pudiendo ser causado por zonas con degradación cerca de los nudos, como los que se han podido observar otros ejemplos de las probetas 48 BIS 2.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D049 (1)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,490					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,16		99,46		30,74	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			14,8
24/03/2021		325			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)				Humedad (%)	Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			13,1
26/03/2021		287,46			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1563	0,0	2420	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,99	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,95
	sd_{drill} (%)	8,61		sd_{drill} (%)	4,52
19,54	\bar{X}_{feed} (%)	14,30	22,86	\bar{X}_{feed} (%)	14,73
	sd_{feed} (%)	3,68		sd_{feed} (%)	3,28



Perforación 3			Perforación 4		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	19,11	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	18,61
	sd_{drill} (%)	2,69		sd_{drill} (%)	3,96
9,66	\bar{X}_{feed} (%)	13,02	9,96	\bar{X}_{feed} (%)	12,76
	sd_{feed} (%)	4,15		sd_{feed} (%)	2,30

Observaciones

General:

- Para el cálculo de la densidad de esta probeta se ha tenido que descontar los trozos que se han desprendido durante el corte de la rebanada.

Perforación 1:

- 6,7 cm: Observación de una bajada en la amplitud resistográfica, pudiendo ser la causa la misma la acebolladura que atraviesa la perforación 2.

Perforación 2:

- 5,7 cm: Baja amplitud resistográfica al atravesar una acebolladura.
- En la lámina 3 se observa un incremento de la amplitud resistográfica causada por la presencia de un nudo.



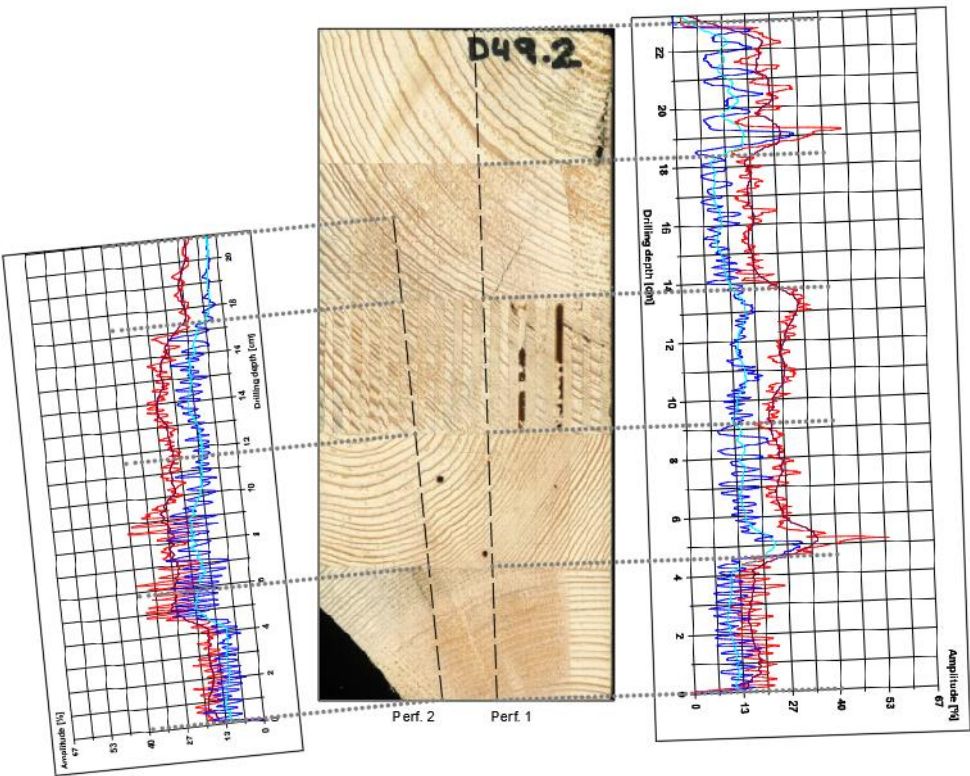
Perforación 3:

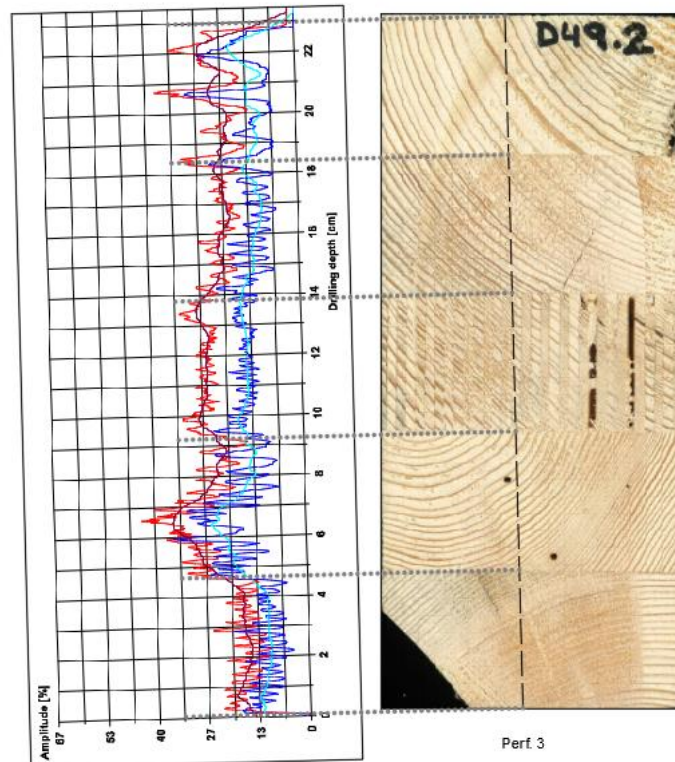
- 4 cm: Justo antes de la interfase hay una bajada de amplitud resistográfica debida al paso por una fenda perpendicular a los anillos de crecimiento.
- 8 cm: Bajada de la amplitud por el paso a través de una fisura en la segunda lámina de la viga.

Perforaciones 3 y 4:

- El resistógrafo ha sufrido parada por sobrecarga por la existencia de madera muy densa correspondiente a la zona del nudo de la lámina 3.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D049 (2)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,456					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,22		96,74		31,89	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,9
24/03/2021		312,8			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					13,2
Fecha		Peso seco (g)			
29/03/2021		276,28			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1655	0,0	2056	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,17	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	21,52
	sd_{drill} (%)	6,08		sd_{drill} (%)	5,87
22,79	\bar{X}_{feed} (%)	13,87	20,97	\bar{X}_{feed} (%)	12,92
	sd_{feed} (%)	4,91		sd_{feed} (%)	5,46



Perforación 3			Perforación 4		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,59	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	
	sd_{drill} (%)	5,76		sd_{drill} (%)	
22,78	\bar{X}_{feed} (%)	13,95		\bar{X}_{feed} (%)	
	sd_{feed} (%)	5,30		sd_{feed} (%)	

Observaciones

General:

- La tercera tabla corresponde a la zona de machihembrado de la unión dentada y encolada para la formación de las láminas de grandes longitudes que componen la viga.
- Para el cálculo de la densidad de esta probeta se ha tenido que descontar los trozos que se han desprendido en el corte de las rebanadas.



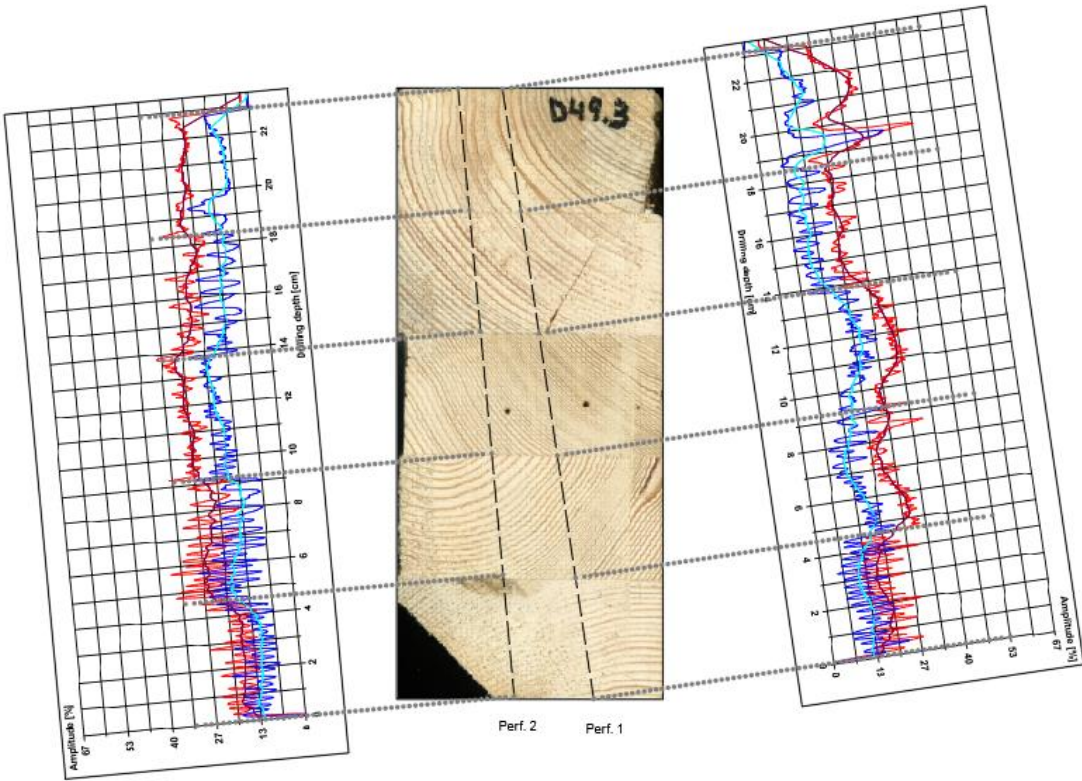
Perforación 1:

- Se aprecia la elevada resistencia en las interfases del encolado.

Perforación 2:

- Debido a una desviación de la trayectoria la broca salió por la cara inferior de la probeta.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D049 (3)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,466					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,44		96,4		29,6	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			16,9
24/03/2021		289,9			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			12,2
26/03/2021		257,35			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1763,5	5,5	2127	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,90	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,63
	sd_{drill} (%)	5,84		sd_{drill} (%)	4,72
23,15	\bar{X}_{feed} (%)	13,94	22,85	\bar{X}_{feed} (%)	14,86
	sd_{feed} (%)	3,03		sd_{feed} (%)	4,48



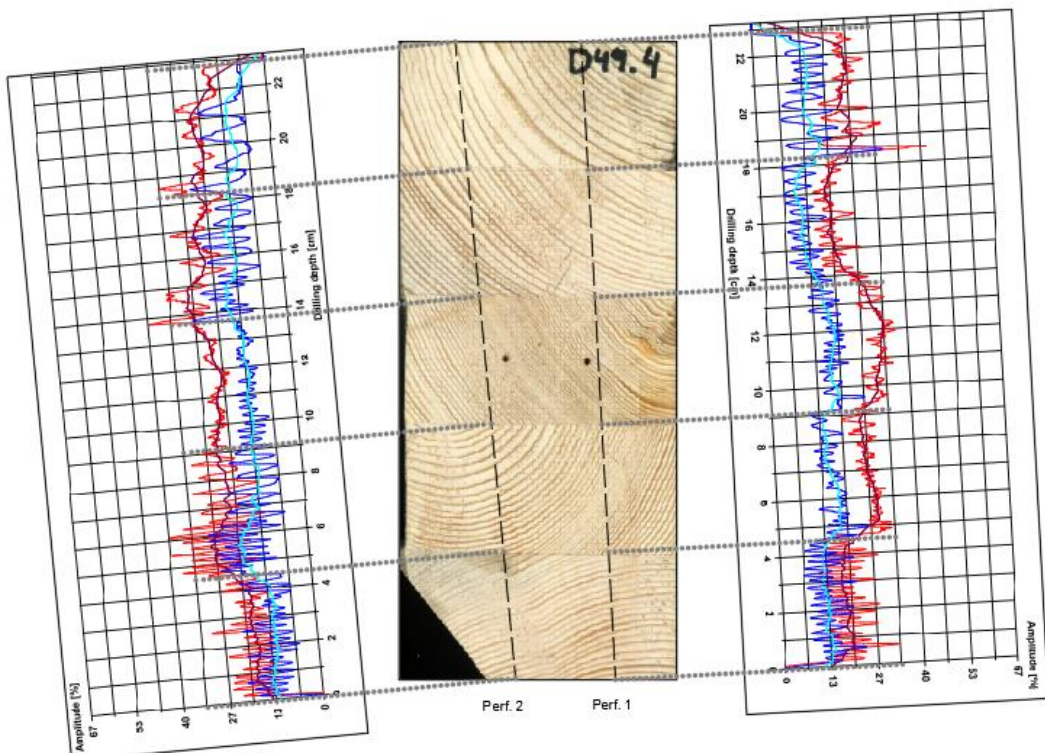


Observaciones

General:

- Para el cálculo de la densidad de esta probeta se ha tenido que descontar los trozos que se han desprendido en el corte de las rebanadas.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D049 (4)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,465					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,23		96,74		31,16	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			16,9
24/03/2021		303,2			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					12,2
Fecha		Peso seco (g)			
26/03/2021		270,12			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1685	0,0	1927	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	24,51	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	21,88
	sd_{drill} (%)	5,74		sd_{drill} (%)	4,91
22,8	\bar{X}_{feed} (%)	14,80	22,79	\bar{X}_{feed} (%)	13,36
	sd_{feed} (%)	4,23		sd_{feed} (%)	4,66



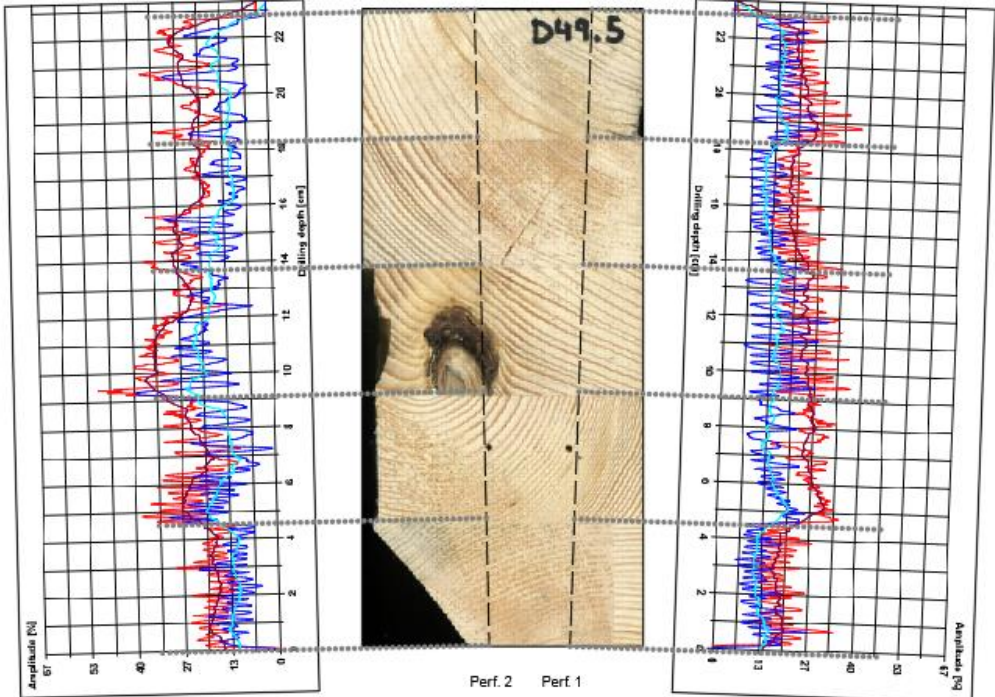


Observaciones

General:

- Para el cálculo de la densidad de esta probeta se ha tenido que descontar los trozos que se han desprendido en el corte de las rebanadas.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D049 (5)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,477					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,43		94,99		33,31	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			14,9
24/03/2021		326,2			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)		12,7	
29/03/2021		289,45			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1989	0,0	1803	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	21,89	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,39
	sd_{drill} (%)	5,72		sd_{drill} (%)	2,03
22,77	\bar{X}_{feed} (%)	14,06	22,74	\bar{X}_{feed} (%)	14,14
	sd_{feed} (%)	4,68		sd_{feed} (%)	3,52



Observaciones



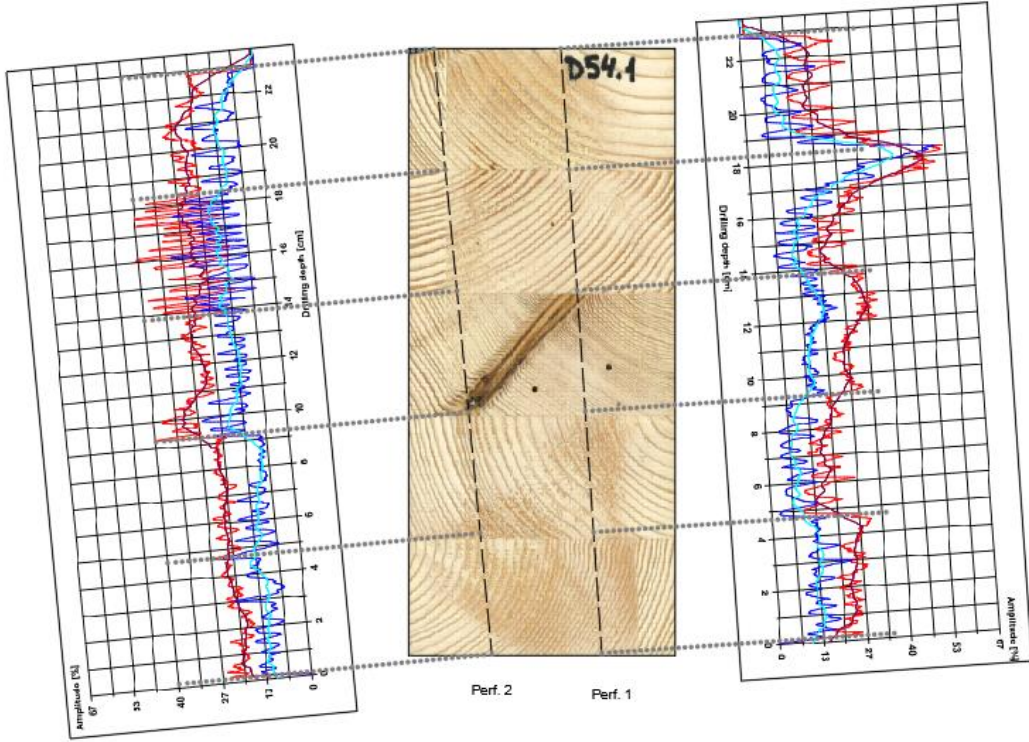
General:

- Para el cálculo de la densidad de esta probeta se ha tenido que descontar los trozos que se han desprendido en el corte de las rebanadas.



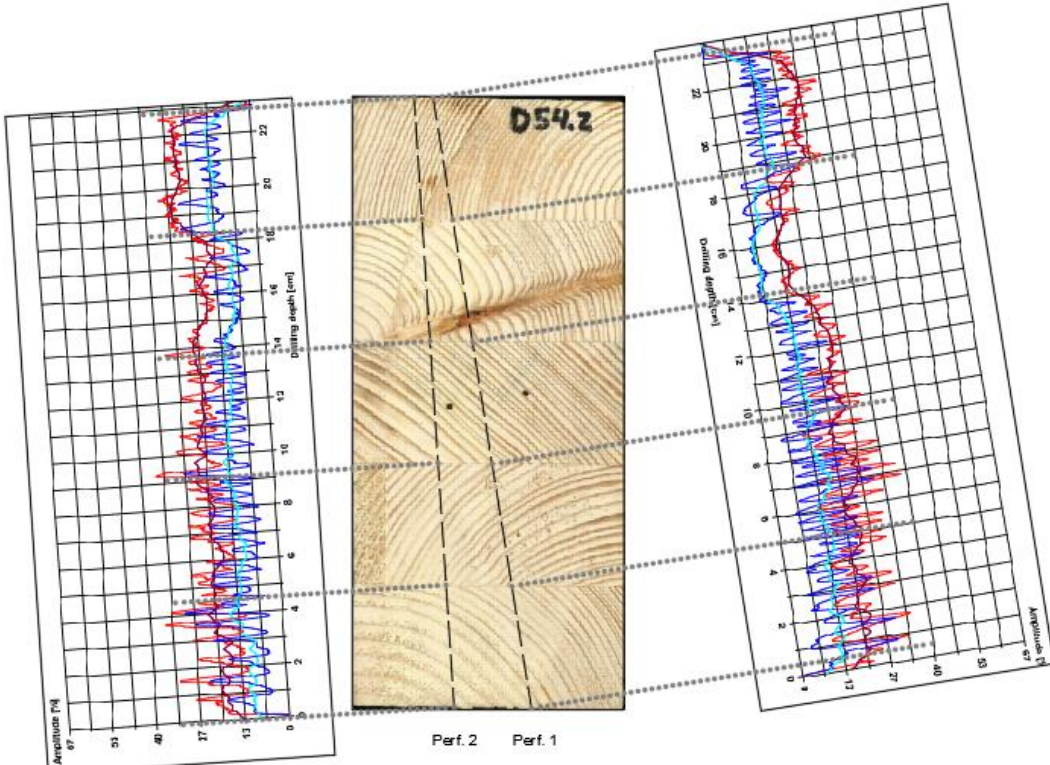
Perforación 2:

- 7,2 cm: bajada de amplitud debida al paso por el orificio del xilohigrómetro.
- 12,3 cm: bajada de amplitud debida al paso por la zona degradada alrededor del nudo.



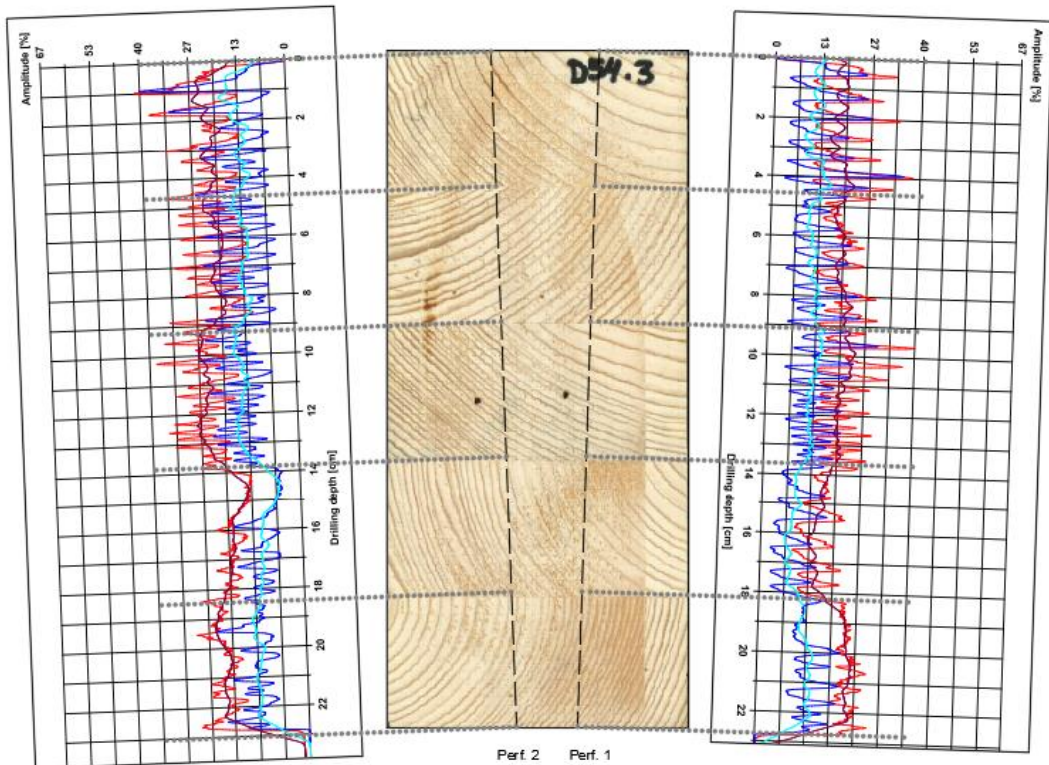


Especie		Nomenclatura			
Abeto		D054 (1)			
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,449					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,01		99,92		31,99	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,6
24/03/2021		325,7			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)				Humedad (%)	Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			12,9
29/03/2021		288,36			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1617	0,0	1712	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	24,06	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	21,66
	sd_{drill} (%)	4,43		sd_{drill} (%)	3,22
	\bar{X}_{feed} (%)	13,29		\bar{X}_{feed} (%)	11,78
	sd_{feed} (%)	4,04		sd_{feed} (%)	5,61
22,81			22,85		
Observaciones					
Perforación 2:					
- 10 cm: incremento de amplitud debida al paso por el nudo.					





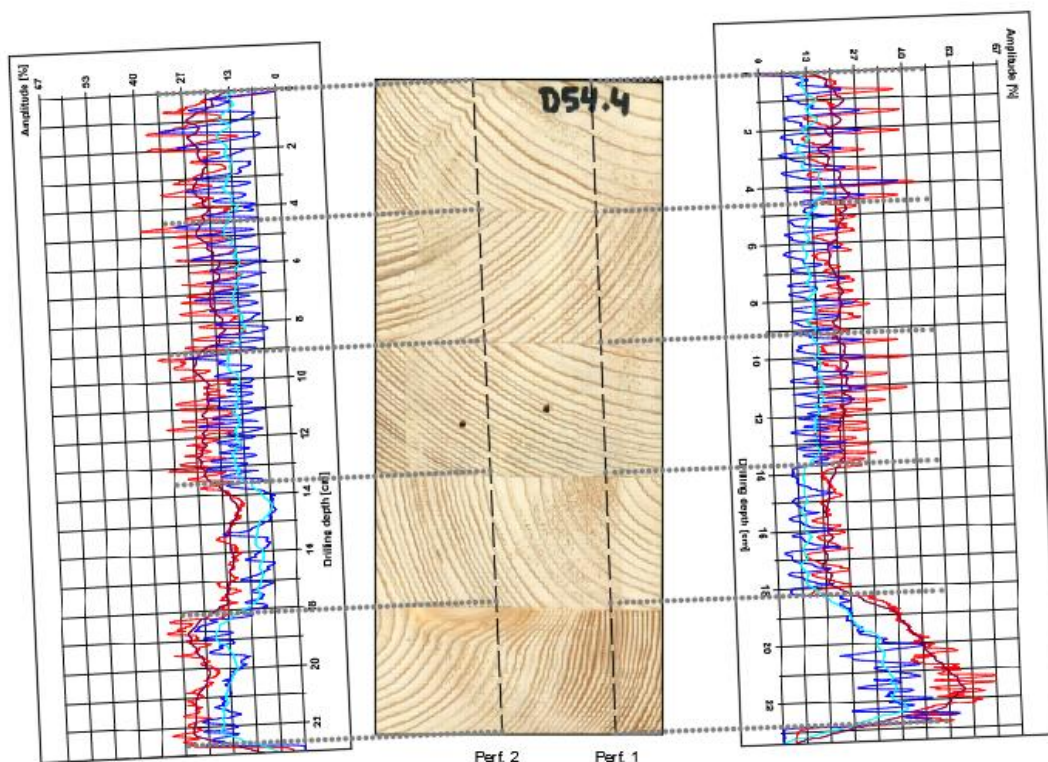
Especie			Nomenclatura		
Abeto			<div>D054 (2)</div>		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,425					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226		100,28		26,14	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,1
24/03/2021		253,5			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					57,7
Fecha		Peso seco (g)			
29/03/2021		223,7			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1599	0,0	1736	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	20,99	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	20,09
	sd_{drill} (%)	2,41		sd_{drill} (%)	4,66
23,15	\bar{X}_{feed} (%)	10,97	22,79	\bar{X}_{feed} (%)	11,09
	sd_{feed} (%)	3,45		sd_{feed} (%)	2,46
Observaciones					



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D054 (3)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,420					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,18		100,25		30,04	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,3
24/03/2021		287,7			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					13,1
Fecha		Peso seco (g)			
29/03/2021		254,33			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1608	0,0	1736	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	21,85	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	19,91
	sd_{drill} (%)	5,31		sd_{drill} (%)	5,40
22,79	\bar{X}_{feed} (%)	12,96	22,76	\bar{X}_{feed} (%)	11,39
	sd_{feed} (%)	5,42		sd_{feed} (%)	2,85
Observaciones					



Especie		Nomenclatura			
Abeto		D054 (4)			
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,446					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,34		100,14		30,87	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15
24/03/2021		313,4			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					12,8
Fecha		Peso seco (g)			
29/03/2021		277,73			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1736	0,0	1868	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance





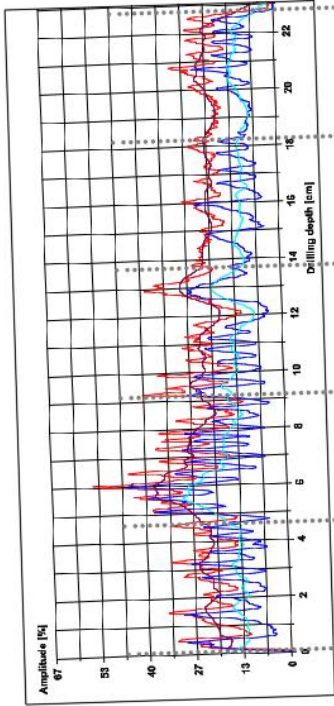

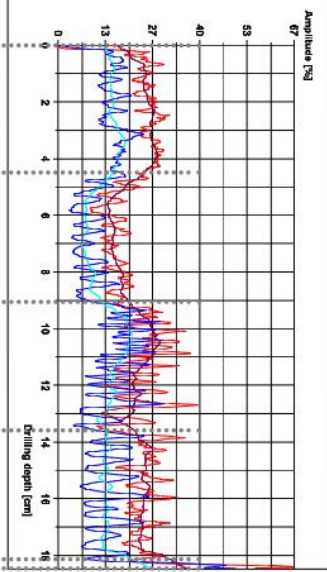
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,00	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	18,56
	sd_{drill} (%)	6,06		sd_{drill} (%)	2,90
22,74	\bar{X}_{feed} (%)	15,09	22,83	\bar{X}_{feed} (%)	12,01
	sd_{feed} (%)	6,15		sd_{feed} (%)	2,67

Observaciones

Perforación 1:

- La subida de amplitud del final se debe al paso por un nudo que no se ve por la cara escaneada.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D054 (5)		
Clase resistente					
GL24					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,458					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226		99,59		27,88	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			13,7
25/03/2021		288,9			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)		13,0	
29/03/2021		255,69			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
25/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1736,5	10,5	2309	65
Perfiles resistográficos					
Fecha	25/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div></div><div></div><div><div>Perf. 2</div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	21,57	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,73
	sd_{drill} (%)	3,20		sd_{drill} (%)	6,69
22,7	\bar{X}_{feed} (%)	11,63	18,46	\bar{X}_{feed} (%)	14,01
	sd_{feed} (%)	2,25		sd_{feed} (%)	6,43



Observaciones

General:

- La perforación 2 se ha efectuado en sentido contrario a la 1, ya que, tras 3 perforaciones, el equipo perforando desde el mismo extremo que la perforación 1, sufría sobrecarga al llegar a la primera interfase.
- La perforación 2 sufre sobrecarga en la misma interfase.



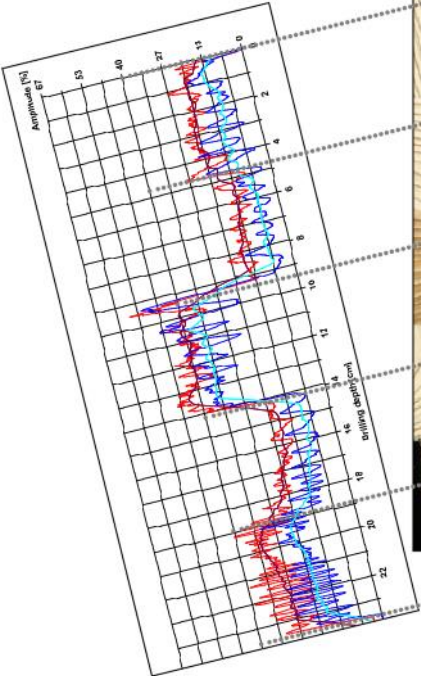
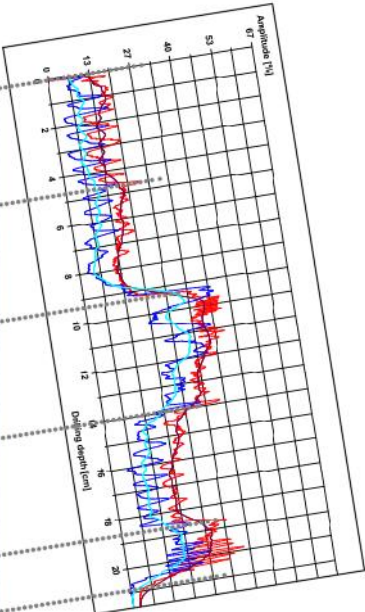
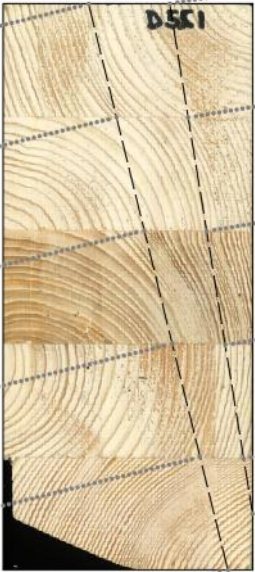
Perforación 1:

- 12 cm: bajada de amplitud debida al paso por el orificio del xilohigrómetro.

Ultrasonidos:

- En esta probeta se han ejecutado dos puntos de medición para cada una de las direcciones transversal y paralela a los planos de encolado. Una de ellas, coincidente como en todas las probetas, desde el punto central de cada lado y la segunda enfocada a inspeccionar la zona de sobrecarga del final de la segunda perforación.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D055 (1)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,437					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,13		100,62		36,25	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,7
23/03/2021		349,4			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			12,1
25/03/2021		311,56			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1493	4,0	2685	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div><div><div>Perf. 1</div><div></div></div><div><div>Perf. 2</div><div></div></div></div><div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	21,11	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	18,46
	sd_{drill} (%)	2,51		sd_{drill} (%)	2,15
23,5	\bar{X}_{feed} (%)	13,22	20,57	\bar{X}_{feed} (%)	11,59
	sd_{feed} (%)	3,24		sd_{feed} (%)	2,88



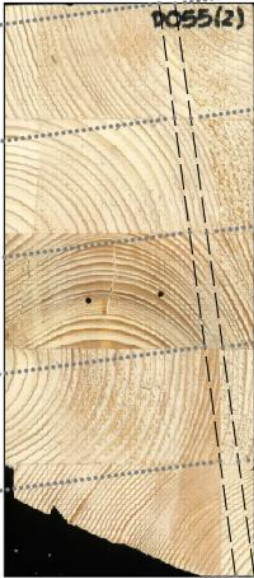
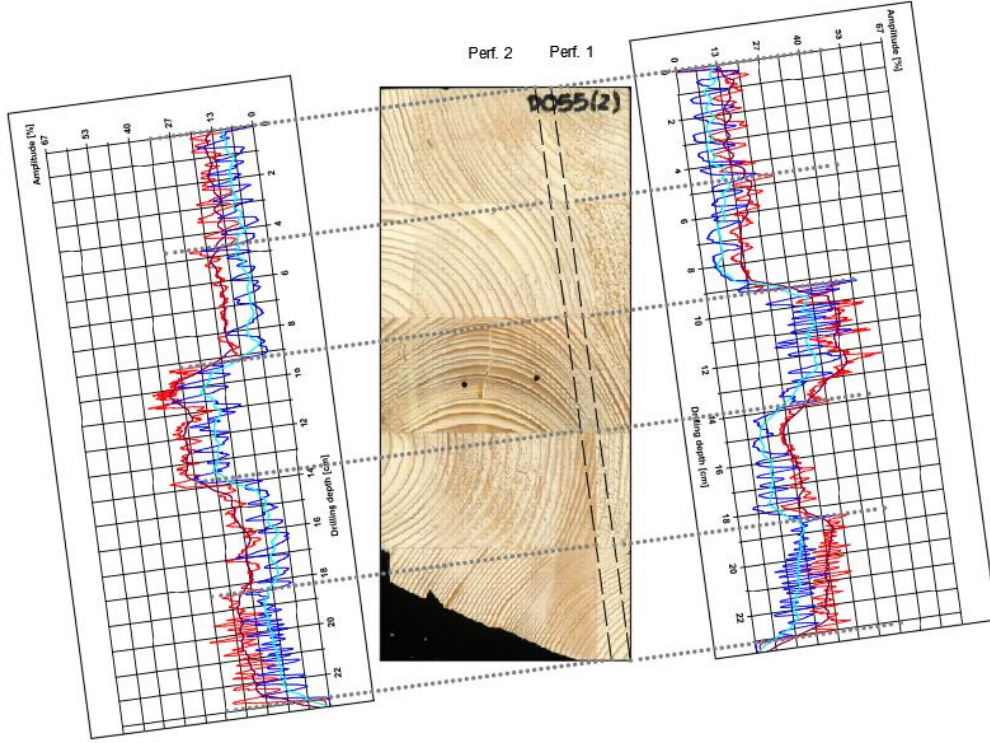


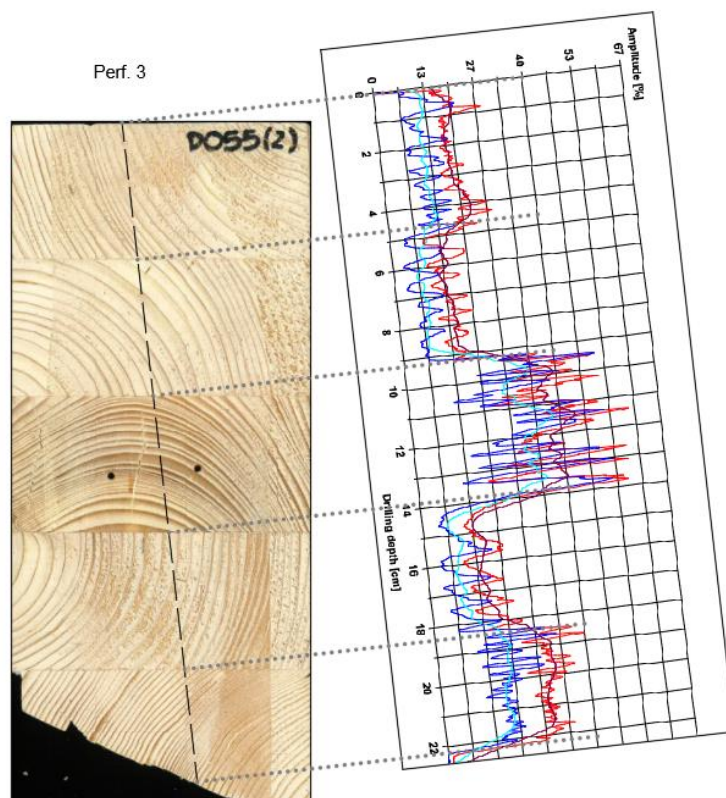
Observaciones

General:

- La lámina 3 de la probeta 55 presenta una densidad mayor que la del resto.
- Para el cálculo de la densidad de esta probeta se ha tenido que descontar los trozos que se han desprendido en el corte de las rebanadas.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D055 (2)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,454					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
218,55		100,5		31,08	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			14,3
23/03/2021		291,6			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			12,4
24/03/2021		259,41			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1651	0,0	2285	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div><div><div>Perf. 2</div><div>Perf. 1</div></div><div></div></div><div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	20,63	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	19,69
	sd_{drill} (%)	2,60		sd_{drill} (%)	2,22
23,04	\bar{X}_{feed} (%)	13,31	22,84	\bar{X}_{feed} (%)	12,74
	sd_{feed} (%)	2,69		sd_{feed} (%)	4,03





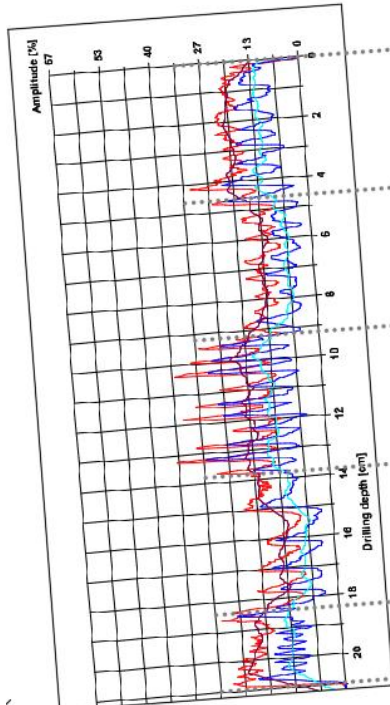
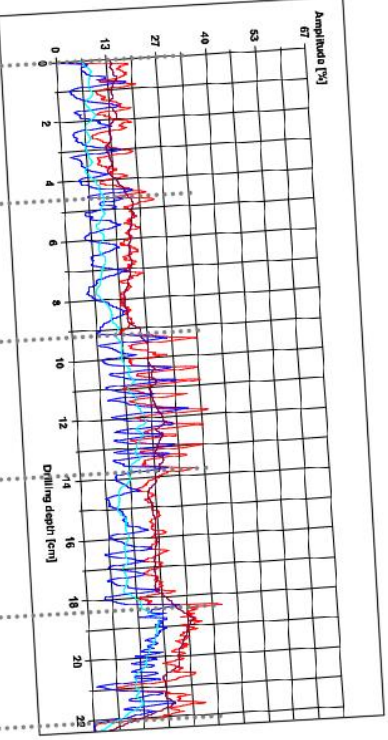

Perforación 3			Perforación 4		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	18,99	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	
	sd_{drill} (%)	1,62		sd_{drill} (%)	
22,21	\bar{X}_{feed} (%)	12,89		\bar{X}_{feed} (%)	
	sd_{feed} (%)	5,33		sd_{feed} (%)	

Observaciones

General:

- La lámina 3 de la probeta 55 presenta una densidad mayor que la del resto.
- Para el cálculo de la densidad de esta probeta se ha tenido que descontar los trozos que se han desprendido en el corte de las rebanadas.



Especie			Nomenclatura			
Abeto			<div>D055 (3)</div>			
Clase resistente						
GL18						
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)						
0,401						
Dimensiones (mm)						
Largo		Ancho		Alto		
221,64		100,61		30,74		
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)	
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,6	
23/03/2021		259,3				
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)	
Fecha		Peso seco (g)			16,6	
24/03/2021		222,31				
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)						
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)		
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica	
		1520	0,0	1433	0,0	
Perfiles resistográficos						
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance	
<div><div><div>Perf. 1</div><div></div></div><div><div>Perf. 2</div><div></div></div><div></div></div>						
Perforación 1			Perforación 2			
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	18,23	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	18,05	
	sd_{drill} (%)	5,65		sd_{drill} (%)	2,45	
20,89	\bar{X}_{feed} (%)	11,28	22,05	\bar{X}_{feed} (%)	11,66	
	sd_{feed} (%)	5,52		sd_{feed} (%)	5,16	



Observaciones

Humedad:

- Única probeta con valor de humedad de xilohigrómetro más bajo que el obtenido con la estufa.
- Valor inusualmente alto de la humedad en estufa.
- Podría darse de un error de transcripción.




General:

- La lámina 3 de la probeta 55 presenta una densidad mayor que la del resto.
- Para el cálculo de la densidad de esta probeta se ha tenido que descontar los trozos que se han desprendido en el corte de las rebanadas.

Perforación 2:

- 20,9 cm: Bajada de amplitud por la existencia de una acebolladura.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D055 (4)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,386					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
225,66		100,54		23,71	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,2
23/03/2021		207,3			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			12,7
24/03/2021		183,97			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1482	0,0	1813	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div><div><div>Amplitud (%)</div><div>67</div><div>55</div><div>40</div><div>27</div><div>13</div><div>0</div></div><div><div>2</div><div>4</div><div>6</div><div>8</div><div>10</div><div>12</div><div>14</div><div>16</div><div>18</div><div>20</div><div>22</div></div><div><div>Drilling depth [cm]</div></div></div><div><div>Perf. 1</div><div></div><div>Perf. 2</div></div><div><div><div>Amplitud (%)</div><div>67</div><div>55</div><div>40</div><div>27</div><div>13</div><div>0</div></div><div><div>2</div><div>4</div><div>6</div><div>8</div><div>10</div><div>12</div><div>14</div><div>16</div><div>18</div><div>20</div><div>22</div></div><div><div>Drilling depth [cm]</div></div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	19,17	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	18,57
	sd_{drill} (%)	3,16		sd_{drill} (%)	4,65
22,66	\bar{X}_{feed} (%)	11,46	22,67	\bar{X}_{feed} (%)	11,74
	sd_{feed} (%)	3,11		sd_{feed} (%)	5,02



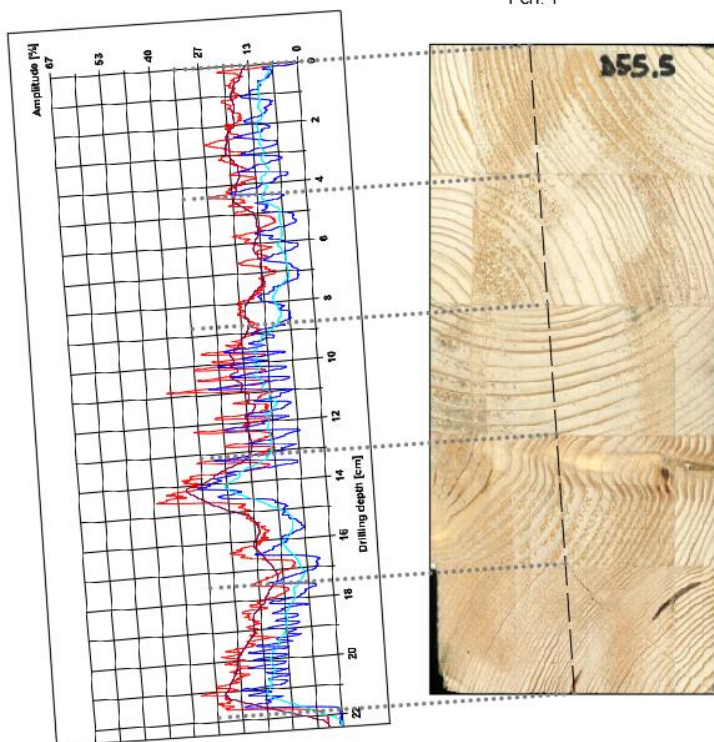


Observaciones

General:

- La lámina 3 de la probeta 55 presenta una densidad mayor que la del resto.
- Para el cálculo de la densidad de esta probeta se ha tenido que descontar los trozos que se han desprendido en el corte de las rebanadas.



Especie			Nomenclatura		
Abeto			D055 (5)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,419					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
225,78		100,74		34,47	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,4
23/03/2021		327,7			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)		12,5	
24/03/2021		291,27			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1551	4,5	1736	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div>Perf. 1</div> <div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	19,33	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	
	sd_{drill} (%)	3,23		sd_{drill} (%)	
21,67	\bar{X}_{feed} (%)	11,90		\bar{X}_{feed} (%)	
	sd_{feed} (%)	3,21		sd_{feed} (%)	



Observaciones



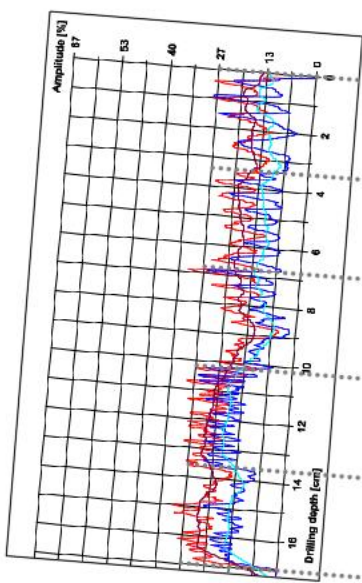
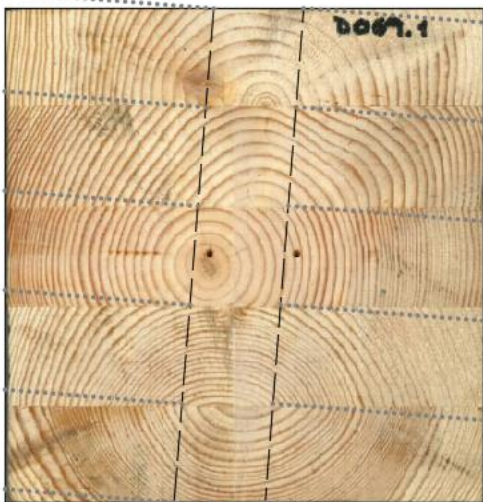
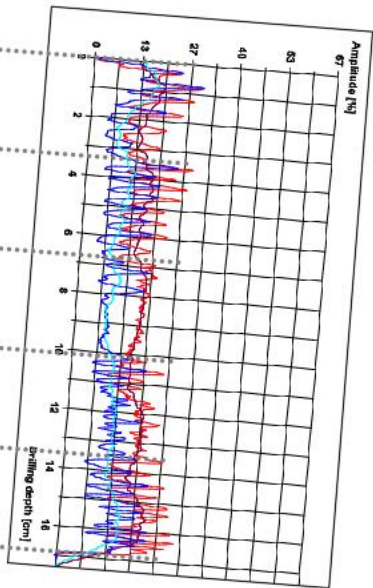
General:

- Para el cálculo de la densidad de esta probeta se ha tenido que descontar los trozos que se han desprendido en el corte de las rebanadas.



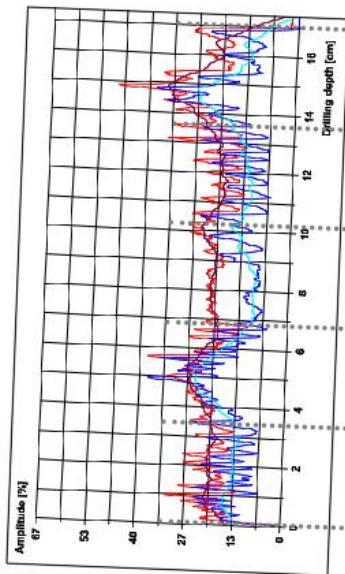
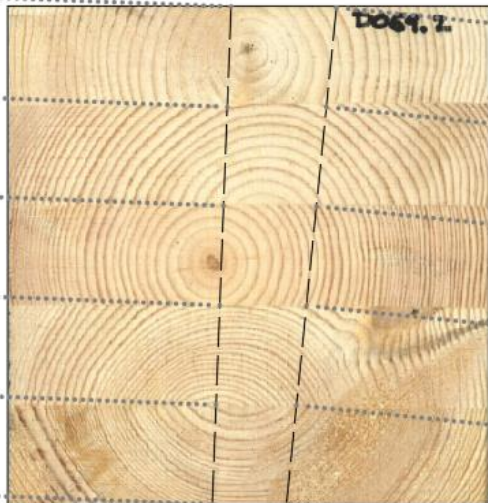
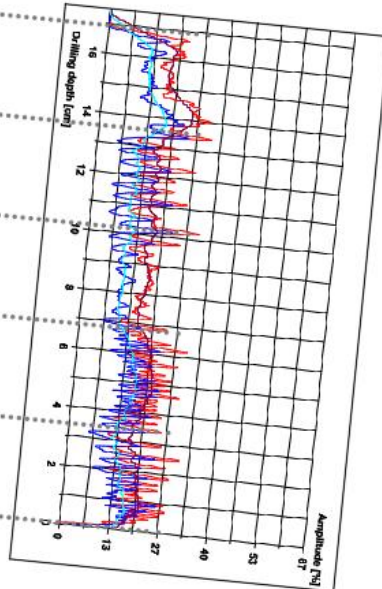
Perforación 1:

- 14 cm: Aumento de la amplitud por existencia de un nudo.



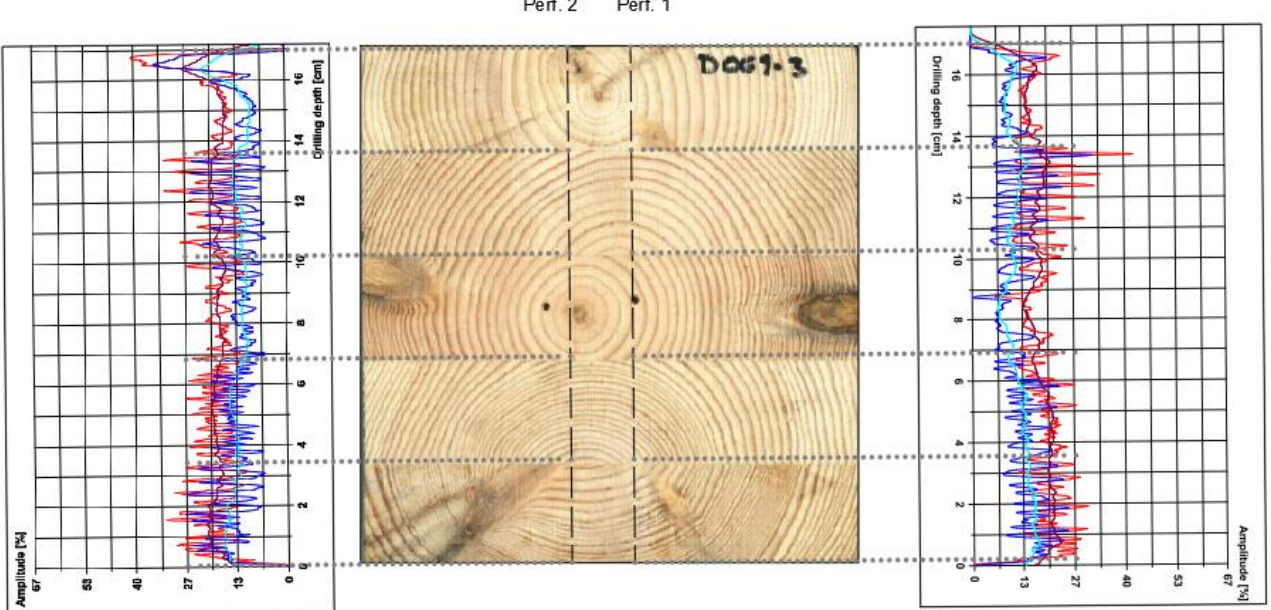


Especie			Nomenclatura		
Pino Silvestre			D069 BIS (1)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,495					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
167,03		159,25		34,04	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,4
23/03/2021		448,8			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			12,3
24/03/2021		399,75			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
23/03/2021		2094	0,0	2595	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div></div><div></div><div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	16,90	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	17,46
	sd_{drill} (%)	3,30		sd_{drill} (%)	3,41
16,85	\bar{X}_{feed} (%)	10,81	16,9	\bar{X}_{feed} (%)	11,49
	sd_{feed} (%)	5,69		sd_{feed} (%)	5,93
Observaciones					
<div>Perforación 2:</div> <div><div>-</div><div>8,8 cm: decrecimiento de la amplitud debido a la cercanía del orificio del xilohigrómetro y la médula del tronco de la madera.</div></div>					



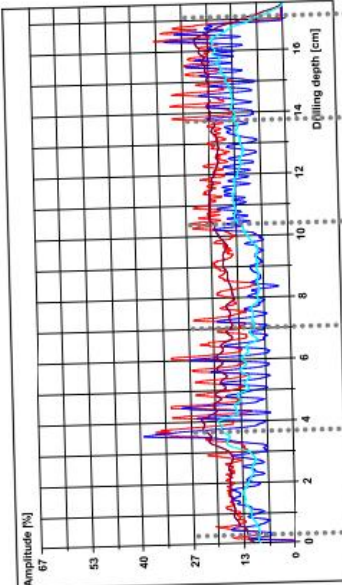
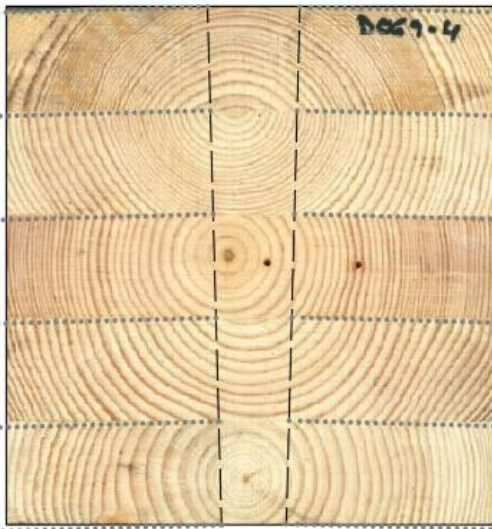
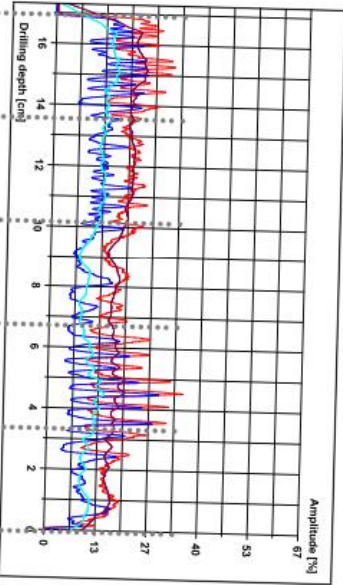


Especie			Nomenclatura		
Pino Silvestre			<div>D069 BIS (2)</div>		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,483					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
166,87		159,67		32,56	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			16,7
23/03/2021		423			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			
24/03/2021		371,99		13,7	
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		2033	0,0	2405	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div><div><div>Perf. 2</div><div></div></div><div><div>Perf. 1</div><div></div></div><div><div>D069.2</div><div></div></div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	16,91	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	20,51
	sd_{drill} (%)	6,75		sd_{drill} (%)	7,59
16,82	\bar{X}_{feed} (%)	12,05	16,94	\bar{X}_{feed} (%)	12,99
	sd_{feed} (%)	5,57		sd_{feed} (%)	4,09
Observaciones					



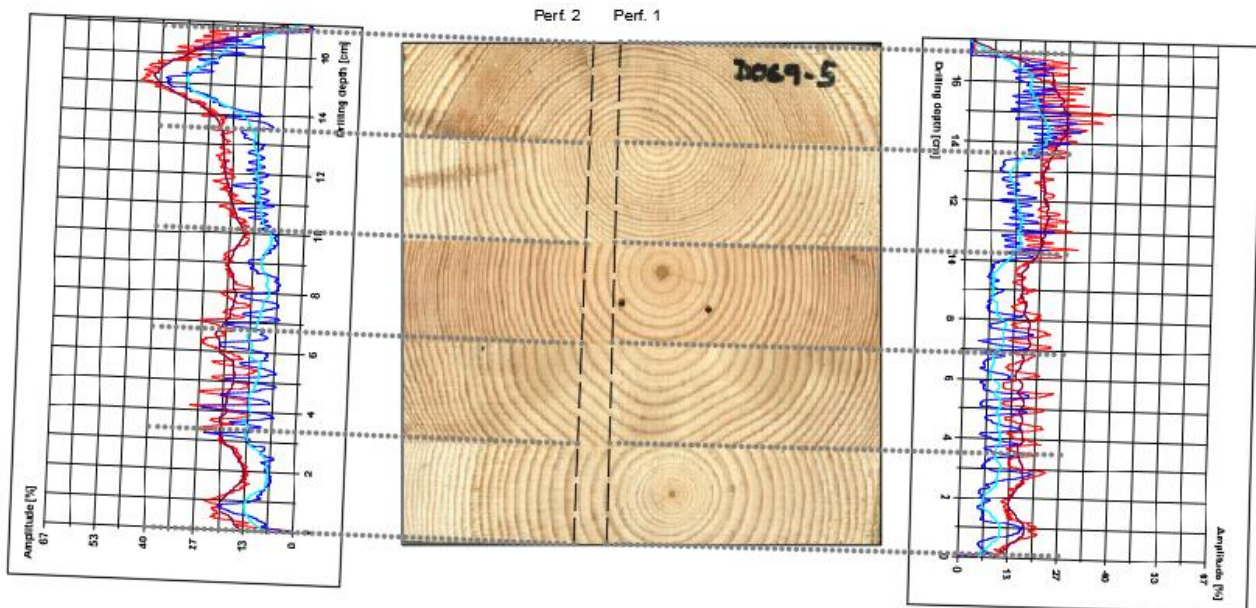


Especie			Nomenclatura		
Pino Silvestre			D069 BIS (3)		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,479					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
159,95		167,15		29,82	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			16,2
23/03/2021		383,4			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					12,7
Fecha		Peso seco (g)			
24/03/2021		340,29			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		2073	0,0	2434	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div>Perf. 2 Perf. 1</div> <div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	16,50	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	17,17
	sd_{drill} (%)	6,82		sd_{drill} (%)	7,20
16,85	\bar{X}_{feed} (%)	10,99	16,89	\bar{X}_{feed} (%)	11,64
	sd_{feed} (%)	5,74		sd_{feed} (%)	3,15
Observaciones					
<p>Perforación 1:</p> <ul style="list-style-type: none">- 8,8 cm: decrecimiento de la amplitud debido a la cercanía del orificio del xilohigrómetro. <p>Perforación 2:</p> <ul style="list-style-type: none">- En el final de la perforación se registran elevados valores por la existencia de un nudo.					



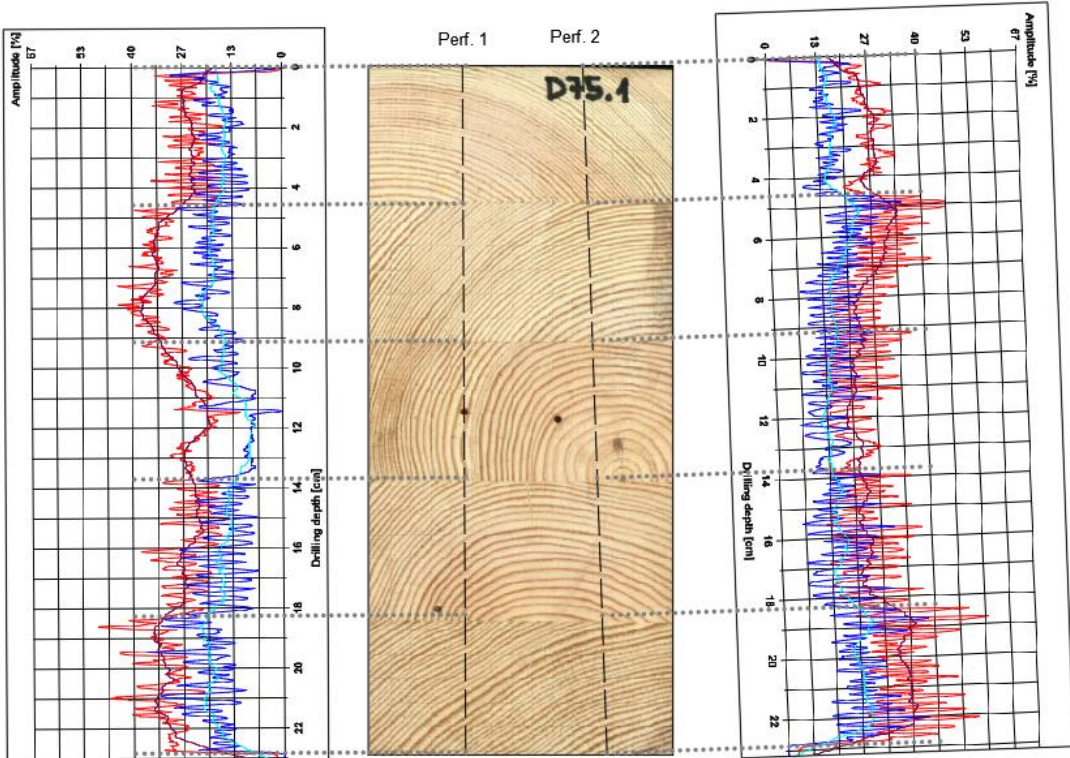


Especie			Nomenclatura		
Pino Silvestre			<div>D069 BIS (4)</div>		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,471					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
167,35		159,39		31,3	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			16,5
23/03/2021		395,6			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					13,0
Fecha		Peso seco (g)			
24/03/2021		350,01			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		2159	0,0	2405	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div><div><div>Perf. 2</div></div><div><div>Perf. 1</div></div><div></div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	17,68	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	16,83
	sd_{drill} (%)	3,36		sd_{drill} (%)	6,75
16,9	\bar{X}_{feed} (%)	10,89	16,9	\bar{X}_{feed} (%)	11,48
	sd_{feed} (%)	5,67		sd_{feed} (%)	6,18
Observaciones					





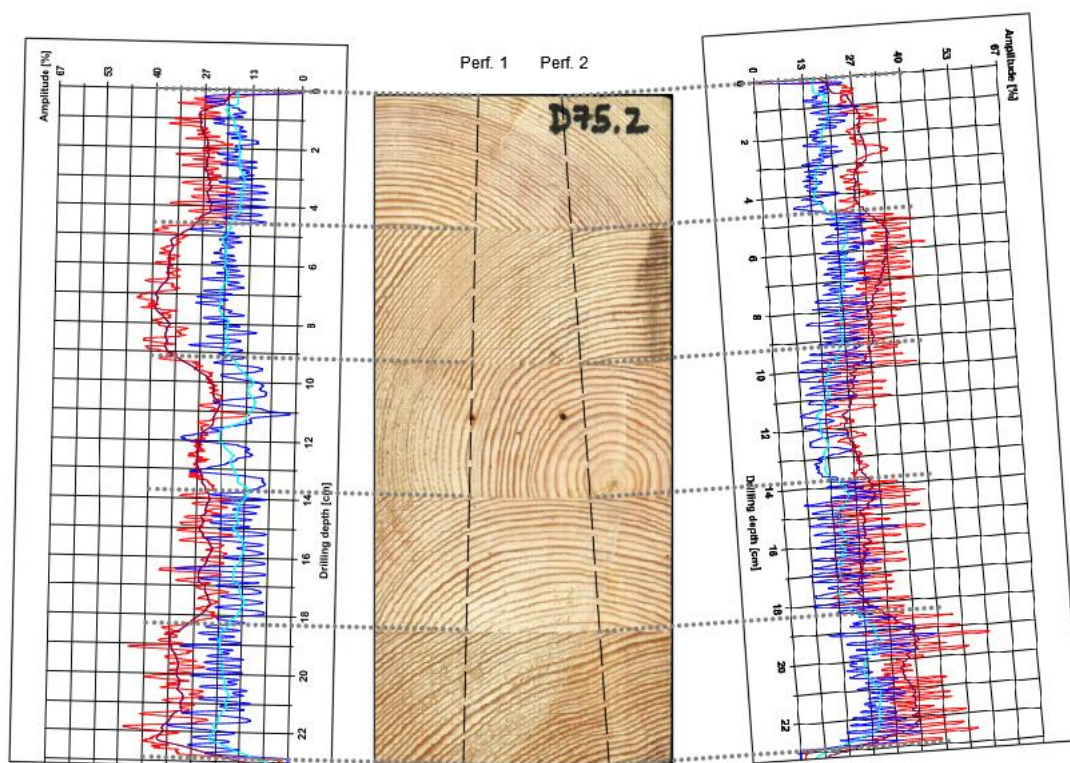
Especie			Nomenclatura		
Pino Silvestre			<div>D069 BIS (5)</div>		
Clase resistente					
GL18					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,489					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
166,67		159,18		34,17	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			15,6
23/03/2021		443,5			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					12,3
Fecha		Peso seco (g)			
24/03/2021		395,07			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
23/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		2094	0	2496	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	23/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	17,05	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	19,80
	sd_{drill} (%)	6,93		sd_{drill} (%)	8,98
16,81	\bar{X}_{feed} (%)	10,03	16,15	\bar{X}_{feed} (%)	11,52
	sd_{feed} (%)	3,49		sd_{feed} (%)	3,83
Observaciones					
<div>Perforación 2:</div> <div>- En el final de la perforación se registran elevados valores por la existencia de un nudo.</div>					



Especie			Nomenclatura		
Pino Silvestre			<div>D075 BIS (1)</div>		
Clase resistente					
GL24					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,530					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,23		101,32		29,18	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)					
Fecha		Peso acondicionado (g)		Humedad (%) Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2) 17,2	
24/03/2021		360,2			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					
Fecha		Peso seco (g)		Humedad (%) Secado en estufa (UNE-EN 13183-1) 15,1	
29/03/2021		313,06			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1838	0,0	2469	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	26,77	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,97
	sd_{drill} (%)	4,85		sd_{drill} (%)	9,61
22,79	\bar{X}_{feed} (%)	15,02	22,77	\bar{X}_{feed} (%)	15,58
	sd_{feed} (%)	6,96		sd_{feed} (%)	7,13
Observaciones					
Perforación 1:					
- 11,5 cm: decrecimiento de la amplitud debido a la cercanía del orificio del xilohigrómetro.					
-					



Especie		Nomenclatura			
Pino Silvestre		D075 BIS (2)			
Clase resistente					
GL24					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,554					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,22		101,31		29,25	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			17,4
24/03/2021		374,6			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					13,7
Fecha		Peso seco (g)			
26/03/2021		329,53			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1887	0,0	2573	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance





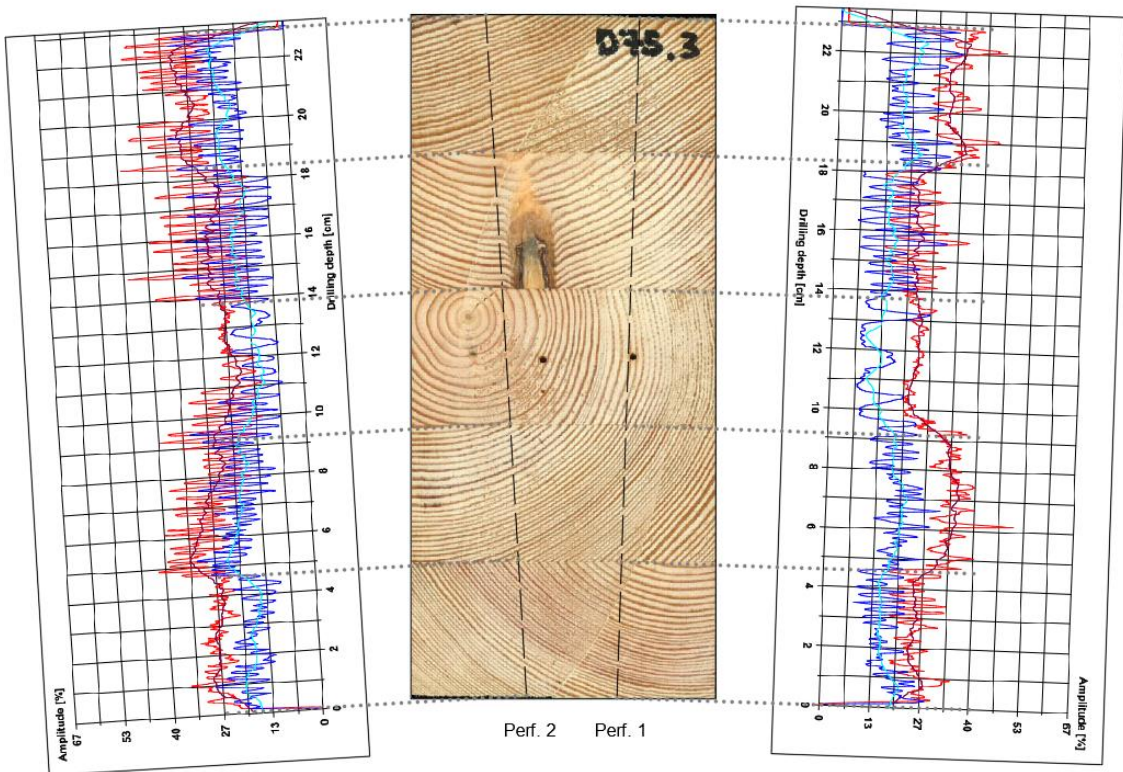
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	26,32	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	24,89
	sd_{drill} (%)	2,52		sd_{drill} (%)	4,88
22,83	\bar{X}_{feed} (%)	16,28	22,86	\bar{X}_{feed} (%)	16,13
	sd_{feed} (%)	3,79		sd_{feed} (%)	7,39

Observaciones



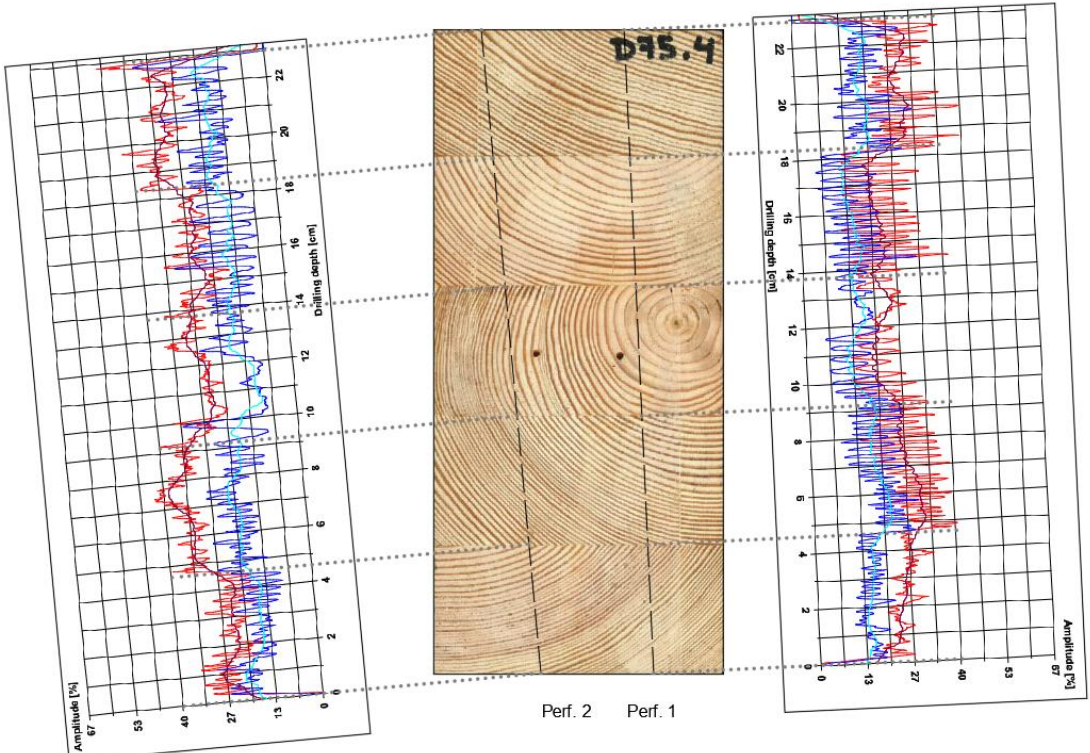
Perforación 1:

- 11 cm: decrecimiento de la amplitud debido a la cercanía del orificio del xilohigrómetro



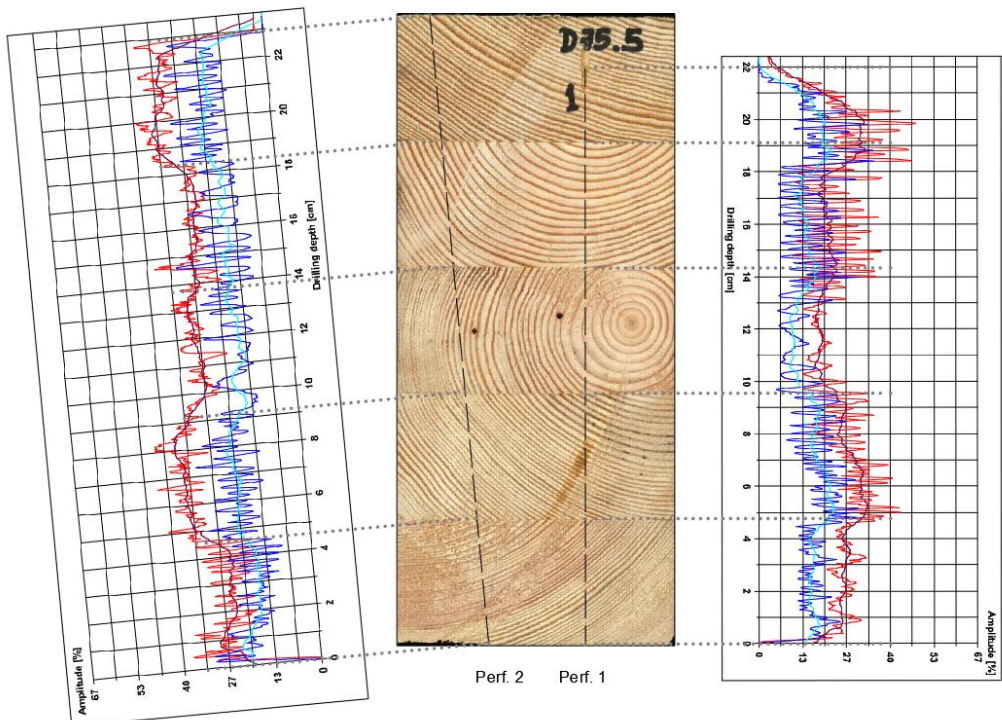


Especie			Nomenclatura		
Pino Silvestre			D075 BIS (3)		
Clase resistente					
GL24					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,551					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,3		101,28		32,04	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			17,8
24/03/2021		410,3			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					14,7
Fecha		Peso seco (g)			
29/03/2021		357,65			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
24/03/2021		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
		1814	0,0	2329	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	25,49	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,86
	sd_{drill} (%)	2,56		sd_{drill} (%)	4,71
22,85	\bar{X}_{feed} (%)	15,37	22,88	\bar{X}_{feed} (%)	15,54
	sd_{feed} (%)	6,99		sd_{feed} (%)	7,09
Observaciones					



Especie			Nomenclatura		
Pino Silvestre			D075 BIS (4)		
Clase resistente					
GL24					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,546					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,84		101,27		30,94	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			17,8
24/03/2021		393			
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fecha		Peso seco (g)			14,6
29/03/2021		342,9			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
24/03/2021		1814	0,0	2745	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	23,94	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	27,17
	sd_{drill} (%)	4,49		sd_{drill} (%)	4,32
22,84	\bar{X}_{feed} (%)	15,86	22,9	\bar{X}_{feed} (%)	15,45
	sd_{feed} (%)	3,22		sd_{feed} (%)	6,91
Observaciones					



Especie			Nomenclatura		
Pino Silvestre			D075 BIS (5)		
Clase resistente					
GL24					
Densidad (g/cm³) (UNE-EN 384:2016+A1)					
0,540					
Dimensiones (mm)					
Largo		Ancho		Alto	
226,18		100,97		33,31	
Fase de acondicionamiento (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % HR)				Humedad (%)	Xilohigrómetro (UNE-EN 13183-2)
Fecha		Peso acondicionado (g)			17,6
24/03/2021		414,3			Secado en estufa (UNE-EN 13183-1)
Fase de secado en estufa (103 ± 2 °C)					13,8
Fecha		Peso seco (g)			
24/03/2021		364,12			
Velocidades medias ultrasónicas (m/s)					
Fecha		Transversal (⊥ encolado)		Transversal (// encolado)	
		Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
26/03/2021		1850	0,0	2685	0,0
Perfiles resistográficos					
Fecha	24/03/2021		Resist. taladrado		Resist. al avance
<div></div>					
Perforación 1			Perforación 2		
Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	22,54	Longitud (cm)	\bar{X}_{drill} (%)	28,33
	sd_{drill} (%)	5,09		sd_{drill} (%)	4,18
21,5	\bar{X}_{feed} (%)	14,09	22,85	\bar{X}_{feed} (%)	16,49
	sd_{feed} (%)	7,35		sd_{feed} (%)	6,61
Observaciones					
<p>Perforación 1:</p> <ul style="list-style-type: none">- Debido a la presencia del nudo en la lámina 3 de la probeta se ha producido una desviación de la trayectoria, saliendo la broca por la superficie superior.					

